

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к выполнению курсового проекта
для студентов очной и заочной форм обучения
специальности 140211 – Электроснабжение и направления
бакалавриата 140400 «Электроэнергетика и электротехника»

Белгород
2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова
Кафедра электроэнергетики

Утверждено
научно-методическим советом
университета

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к выполнению курсового проекта
для студентов очной и заочной форм обучения
специальности 140211 – Электроснабжение и направления
бакалавриата 140400 «Электроэнергетика и электротехника»

Белгород
2013

УДК 621.3 (07)
ББК 31.27 я7
П27

Составители: ст. преподаватель *С.В. Килин*
ст. преподаватель *М.А. Синдецкий*
ассистент *Р.С. Сингатулин*
ассистент *Ю.Ю. Клименко*
ст. преподаватель *М.Ю. Михайлова*

Рецензент канд. техн. наук, доцент Харьковской национальной академии
городского хозяйства *А.В. Сапрыка*

Переходные процессы в электроэнергетических системах:
П27 методические указания к выполнению курсового проекта для
студентов очной и заочной форм обучения специальности 140211 –
Электроснабжение и направления бакалавриата 140400 «Электро-
энергетика и электротехника» /сост.: С.В. Килин, М.А. Син-
децкий, Р.С. Сингатулин и др. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. – 79 с.

В методических указаниях рассмотрены общие положения предъявляемые для токов короткого замыкания. Даны основные формулы и пример курсового проекта для успешного расчета и защиты курсового проекта.

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной форм обучения специальности 140211 – Электроснабжение и направления бакалавриата 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Данное издание публикуется в авторской редакции.

УДК 621.3 (07)
ББК 31.27 я7

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1. Определение параметров элементов, составление и преобразование схем замещения.....	4
2. Расчет трехфазного короткого замыкания.....	10
3. Расчет несимметричных коротких замыканий.....	27
4. Пример расчета трехфазного и несимметричного короткого замыкания.....	36
5. Библиографический список.....	79

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ, СОСТАВЛЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Общие положения

Расчеты токов короткого замыкания выполняются как правило без учета активных сопротивлений и проводимостей элементов сети, а также фазовых сдвигов между векторами ЭДС источников. Поэтому для составления схем замещения заданной электрической схемы необходимо определить лишь индуктивные сопротивления всех элементов сети и ЭДС источников, подпитывающих точку короткого замыкания.

Сопротивлениям, определяемым в результате преобразования схем замещения, присваиваются порядковые номера. При определении сопротивлений отдельных элементов (воздушных линий, реакторов) необходимо использовать значение среднего напряжения в месте установки данного элемента, выбранное из ряда: 515; 340; 230; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3 кВ.

При переходе от расчета сверхпереходного к расчету установившегося режима схема замещения изменяется. Поэтому составление и упрощение схемы замещения нужно выполнить как для сверхпереходного, так и для установившегося режима короткого замыкания.

При расчете тока несимметричного короткого замыкания необходимо составить и выполнить преобразование схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Схема прямой последовательности аналогична схеме замещения при определении сверхпереходного тока трехфазного короткого замыкания.

Параметры элементов для отдельных последовательностей

Параметры элементов для схемы прямой последовательности определяется в соответствии с заданием, в котором они даны в относительных единицах при номинальных условиях, либо в именованных единицах (воздушные линии, реакторы). Расчет параметров отдельных последовательностей для различных элементов выполняется следующим образом:

А. Генераторы. В сверхпереходном режиме генераторы замещаются сверхпереходными ЭДС $E_{Г*}''$ за сверхпереходными сопротивлениями X_d'' , а в установившемся режиме короткого замыкания. —

синхронной ЭДС $E_{Г*}$ и сопротивлением X_d Э.Д.С генераторов определяется по формуле:

$$E_* = \sqrt{(X_G \cos \varphi_H)^2 + (1 \pm X_G \sin \varphi_H)^2} \quad (1.1)$$

где $X_G = X_d''$ - при определении E_{r*} ;

$X_G = X_d$ - при определении E_{r*} .

Причем знак минус принимается в случае работы гидрогенераторов в режиме недовозбуждения; знак плюс и минус у турбогенераторов – принимается в режиме перевозбуждения и недовозбуждения.

Схемы соединений обмоток трансформаторов исключают протекание через генераторы токов нулевой последовательности. Определение сопротивлений генераторов в относительных единицах при базисных условиях выполняется по формуле:

$$X_{*(\delta)} = X_G \frac{S_\delta \cos \varphi_H}{P_H} \quad (1.2)$$

Б. Нагрузки. Нагрузки в схему замещения для сверхпереходного режима входят как источники с параметрами $E_{H*}'' = 0.85$, $X_{H*}'' = 0.35$, а в установившемся режиме короткого замыкания - $E_{H*\infty} = 0$, $X_{H*\infty} = 1.2$.

Для обратной последовательности $X_{2H*} = 0.35$.

Сопротивление нулевой последовательности нагрузки определяется сопротивлениями и схемами соединения входящих в нее элементов. Обычно это только понижающие трансформаторы, подключенные к сети 110 кВ и выше, имеющие заземленную нейтраль. Рекомендуются принимать $X_{OH*} = 0.15$.

Приведение сопротивлений нагрузки к базисным условиям выполняется по формуле:

$$X_{*(\delta)} = X_H \frac{S_\delta}{S_H} \quad (1.3)$$

В. Трансформаторы. Для трансформаторов:

$$X_{IT*(\delta)} = X_{2H*(\delta)} = \frac{U_{K\%} \cdot S_\delta}{100 \cdot S_H} \quad (1.4)$$

Г. Система.

Для системы бесконечной мощности:

$$X_{1C} = X_{2C} = X_{0C} = 0 \quad (1.5)$$

Для системы конечной мощности рекомендуется принимать $X_{1C} = X_{2C}$, $X_{0C} = 0$.

Сопротивление прямой (обратной) последовательности системы конечной мощности, отнесенное к базисным условиям:

$$X_{1C*(\delta)} = X_{2C*(\delta)} = \frac{S_{\delta}}{S_C} \quad (1.6)$$

За этим сопротивлением считается подключенным источник с $E_{C*} = 1$.

Д. Воздушные линии. Сопротивление прямой и обратной последовательности линий электропередачи, приведенное к базисным условиям, равно:

$$X_{1Л*(\delta)} = X_{2Л*(\delta)} = X_{уд} L \frac{S_{\delta}}{U_{CP}^2} \quad (1.7)$$

где $X_{уд}$ - индуктивное сопротивление линии на 1 км длины, Ом/км;

L - длина линии, км;

U_{CP} - среднее напряжение в месте установки элемента (в данном случае – ЛЭП), кВ.

Сопротивление нулевой последовательности значительно больше, чем прямой (обратной) последовательности. Рекомендуется принимать это сопротивление, как для воздушной линии с тросами:

- для одноцепной линии $X_{0Л} = 3.0 X_{1Л}$

- для двухцепной линии $X_{0Л} = 4.7 X_{1Л}$

Е. Реакторы. Сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательности реакторов равно:

$$X_{P*(\delta)} = X_P \frac{S_{\delta}}{U_{CP}^2} \quad (1.8)$$

Схемы замещения отдельных последовательностей

Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей составляются в соответствии с заданной схемой электриче-

ских соединений при расчете тока несимметричного короткого замыкания.

Схема прямой последовательности соответствует схеме, составленной для расчета действующего значения периодической составляющей сверхпереходного тока симметричного трехфазного короткого замыкания. Генераторы и нагрузки вводятся в нее соответствующими реактивностями и ЭДС

Схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности, но не содержит ЭДС Генераторы и нагрузки вводятся в схему своими сопротивлениями обратной последовательности (X_2).

Схема нулевой последовательности определяется соединением обмоток участвующих в ней трансформаторов и автотрансформаторов и способом заземления нейтрали. В общем случае эта схема отличается от схем обратной и прямой последовательностей. При составлении схемы необходимо помнить, что ток нулевой последовательности является по существу однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельным ей цепям. Ток нулевой последовательности может протекать только в сторону обмоток трансформаторов, соединенных в звезду с заземленной нейтралью.

Схему нулевой последовательности начинают составлять от точки короткого замыкания.

Началом схем прямой, обратной и нулевой последовательности считают точку нулевого потенциала, а концом схемы – точка короткого замыкания. К концу схемы приложено напряжение соответствующей последовательности (U_{K1}, U_{K2}, U_{K0}).

Эквивалентные преобразования исходной схемы

Целью преобразования схемы замещения является ее приведение к простейшему виду.

Преобразования, применяемые в расчетах обычных линейных электрических цепей, включают в себя нахождение эквивалентной ЭДС, последовательное и параллельное сложение сопротивлений, преобразование треугольника в звезду и обратно, многолучевой звезды в многоугольник.

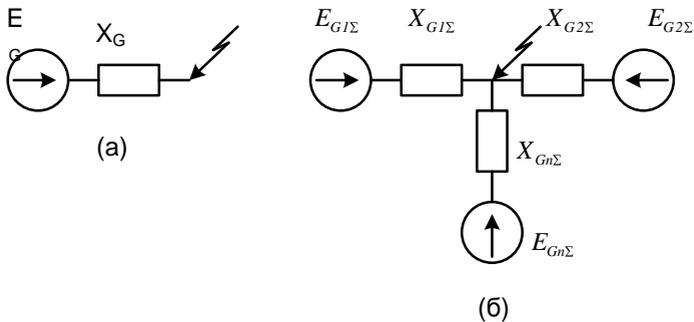


Рис.1.1. Преобразование схемы замещения системы в случае одной группы источников (а) n -групп (б)

Преобразование схем замещения приведены в таблице 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

Преобразование схем замещения

№ п\п	Вид преобразования	Схема до преобразования	Схема после преобразования
1	Преобразование треугольника в звезду		
2	Преобразование звезды в треугольник		
3	Замена нескольких источников эквивалентным		

Если схема замещения содержит источники со значительно отличающимися параметрами, то они объединяются так, чтобы каждая

группа содержала источники с близкими параметрами. Тогда простейшая схема, к которой приводится любая схема замещения, будет иметь вид, показанный на рис. 1.1, а.

Таблица 1.2

Формулы преобразования схем замещения

№ п\п	Вид преобразования	Сопrotивление элементов схемы после преобразования
1	Преобразование треугольника в звезду	$X_F = \frac{X_{FG} \cdot X_{HF}}{X_{FG} + X_{HF} + X_{GH}},$ $X_G = \frac{X_{FG} \cdot X_{GH}}{X_{FG} + X_{HF} + X_{GH}}$ $X_H = \frac{X_{HF} \cdot X_{GH}}{X_{FG} + X_{HF} + X_{GH}}$
2	Преобразование звезды в треугольник	$X_{FG} = X_F + X_G + \frac{X_F X_G}{X_H},$ $X_{HG} = X_H + X_G + \frac{X_H X_G}{X_F},$ $X_{HF} = X_F + X_H + \frac{X_F X_H}{X_G}.$
3	Замена нескольких источников эквивалентным	$E_{\text{экв}} = \frac{I}{Y_{\text{экв}}} \sum_{K=1}^n Y_K E_K,$ <p>где</p> $Y_{\text{экв}} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n,$ $Y_1 = \frac{I}{X_1}; Y_2 = \frac{I}{X_2}; \dots; Y_n = \frac{I}{X_n}$ <p>При двух ветвях</p> $E_{\text{экв}} = \frac{E_1 X_2 + E_2 X_1}{X_1 + X_2}$

2. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Порядок расчета токов при трехфазном коротком замыкании.

1. Для заданной точки короткого замыкания составляется расчетная схема.
2. Для расчетной схемы составляется ее эквивалентная схема замещения.
3. Схема замещения путем последовательных эквивалентных преобразований приводится к простейшей схеме: результирующий источник - результирующее сопротивление - точка короткого замыкания.
4. По упрощенной схеме определяется значение периодической составляющей тока в месте короткого замыкания, используя либо аналитический способ определения тока короткого замыкания, либо метод типовых кривых.
5. Определяется ударный ток и наибольшее действующее значение тока короткого замыкания.

Расчетная схема

Составляется для одной точки короткого замыкания. Представляет собой однолинейную схему электроснабжения, где указываются элементы (генератора, трансформатора, линии и т.п.), через которые проходят токи источников в точку короткого замыкания. Кроме того, на расчетной схеме указываются номинальные напряжения. При расчетах токов короткого замыкания в установках высокого напряжения сопротивления шин распределительных устройств, электрических аппаратов (выключателей, разъединителей и т.п.), кабельных и воздушных перемычек сравнительно небольшой длины не учитывают из-за малого значения. Поэтому их параметры на расчетной схеме не указываются.

Составление схем замещения системы

Схема замещения представляется в однолинейном изображении (для одной фазы) и содержит все элементы расчетной схемы. Элементы вводят в схему их эквивалентными сопротивлениями, а источниками питания, кроме того, и ЭДС. Сопротивления и ЭДС целесообразно обозначать порядковыми номерами, а под чертой указывать их величины в относительных или именованных единицах.

Схемы замещения можно составлять методом точного или приближенного приведения, выражая параметры режима и элементов системы в именованных или относительных единицах.

Составление схемы замещения по точному приведению, используя именованные единицы

Порядок составления при этом способе следующий:

1. Расчетная схема делится на ступени трансформации.
2. Выбирается произвольно базисная ступень.
3. Определяется сопротивление и ЭДС элементом расчетной схемы при базисных условиях:

- для генераторов:

$$X_d'' = X_{*d}'' \cdot \frac{U_n^2 \cdot \cos(\varphi_n)}{P_n} \cdot (K_1 \cdot K_2 \dots K_n)^2; \quad (2.1)$$

$$E_G'' = E_{*G}'' \cdot U_n \cdot (K_1 \cdot K_2 \dots K_n). \quad (2.2)$$

- для трансформаторов:

$$X_T = \frac{U_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} \cdot (K_1 \cdot K_2 \dots K_n)^2 \quad (2.3)$$

-для реактора:

$$X_P = X_P \cdot (K_1 \cdot K_2 \dots K_n)^2 \quad (2.4)$$

-для линии:

$$X_{Л} = X_{y\delta} \cdot l \cdot (K_1 \cdot K_2 \dots K_n)^2 \quad (2.5)$$

-для системы С:

$$E_C'' = E_{*C}'' \cdot U_{cp} \cdot (K_1 \cdot K_2 \dots K_n) \quad (2.6)$$

где: U_n - номинальное напряжение элемента, кВ;

P_n - номинальная активная мощность элемента, МВт;

S_n - номинальная полная мощность элемента, МВА;

U_k - напряжение короткого замыкания трансформатора;

$X_{y\delta}$ - удельное индуктивное сопротивление линии, Ом/км; l - длина

линии, км; X_P - сопротивление реактора, Ом; U_{cp} - среднее напря-

жение ступени, на которой находится элемент, кВ; $K_1 \cdot K_2 \dots K_n$ -

коэффициенты трансформации трансформатора, определяемые как отношение их линейных номинальных напряжений в направлении от основной (базисной) ступени к ступени, на которой рассматриваемый элемент. Число учтенных K равняется числу трансформации между базисной ступенью и ступенью, на которой находится рассматриваемый элемент. Для пересчета сопротивления двухобмоточного трансформатора можно брать его любую обмотку, т.е. высокую или низшую. Тогда число учтенных K в выражении этого трансформатора равняется числу трансформации между приводимой обмоткой и принятой базисной ступенью.

4. Начертить составленную схему замещения.

Составление схемы замещения по приближенному приведению, используя именованные единицы

Выполняется в следующей последовательности:

1. Расчетная схема делится на ступени трансформации.
2. Для каждой ступени напряжения устанавливается среднее напряжение U_{cp} согласно шкале средних номинальных напряжений:

515; 340; 230; 154; 115; 87; 24; 20; 18; 15, 75; 13,8; 10,5; 6,3; 0,4 кВ.

Принимая для каждой ступени U_{cp} считают, что номинальные напряжения всех элементов, включенных на данной ступени, равны ее среднему напряжению.

3. Выбирается произвольно базисная (основная) ступень и устанавливается величина базисного напряжения $U_{\delta} = U_{cp}$, где U_{cp} - среднее напряжение базисной ступени, кВ.

4. Определяются ЭДС и сопротивления элементов расчетной схемы при базисных условиях.

При приближенном приведении коэффициенты трансформации трансформаторов определяются не как отношения их номинальных напряжений, как это делается при точном приведении, а как отношения их соответствующих средних напряжений. При этом напряжения всех промежуточных ступеней сокращаются, и остается лишь отношение двух напряжений – основной ступени и той ступени, на которой производится пересчет величин:

$$E = \frac{U_{\delta}}{U_{cp}} E; X = \left(\frac{U_{\delta}}{U_{cp}} \right)^2 X \quad (2.7)$$

Формула пересчета ЭДС и сопротивления конкретных элементов имеет вид:

-для генераторов:

$$X_d'' = X_d'' \cdot \frac{U_{\delta}^2 \cdot \cos(\varphi)}{P_n}, \quad (2.8)$$

$$E_{Г}'' = E_{*Г}'' \cdot U_{\delta}$$

-для трансформаторов:

$$X_T = \frac{U_k \cdot U_{\delta}^2}{100 \cdot S_n} \quad (2.9)$$

-для реактора:

$$X_P = X_P \cdot \frac{U_{\delta}^2}{U_{cp}^2} \quad (2.10)$$

-для линии:

$$X_L = X_{y\delta} \cdot l \cdot \frac{U_{\delta}^2}{U_{cp}^2} \quad (2.11)$$

-для системы С:

$$E_C'' = E_{*C}'' \cdot U_{\delta} \quad (2.12)$$

где: U_{δ} - базисное напряжение основной ступени, кВ; U_{cp} - среднее напряжение той ступени, на которой находится элемент, кВ.

*Составление схемы замещения по точному приведению,
используя относительные единицы*

Выполняется в следующей последовательности:

1. Расчетная схема делится на ступени трансформации;
2. Выбирается произвольно базисная ступень и базисные условия S_{δ} , U_{δ} .

За базисную мощность S_{δ} , которая во всех ступенях трансформации одинакова, рекомендуется принимать $S_{\delta} = 100; 1000$; МВА и т.д. За базисное напряжение можно принять $U_{\delta} = U_{cp}$ где U_{cp} - среднее напряжение выбранной базисной ступени (см. шкалу средних номинальных напряжений), кВ;

3. Устанавливаются базисные напряжения на других ступенях трансформации $U_{\bar{o}i} = \frac{U_{\bar{o}}}{K_1 \cdot K_2 \dots K_n}$, кВ, где i - номер ступени;

$K_1 \cdot K_2 \dots K_n$ - коэффициент трансформации трансформаторов, последовательно включенных в схеме. Определяются как отношение их линейных напряжений в направлении от базисной ступени к ступени, для которой устанавливается $U_{\bar{o}i}$. Число учтенных K равняется числу трансформации между основной и рассматриваемой ступени;

4. Для каждой ступени определяется базисный ток

$$I_{\bar{o}i} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}i}} \quad (2.13)$$

5. Определяются сопротивления и ЭДС элементов расчетной схемы при базисных условиях:

- для генераторов:

$$X_d'' = X_d'' \cdot \frac{S_{\bar{o}} \cdot \cos(\varphi)}{P_n} \cdot \left(\frac{U_n}{U_{\bar{o}}} \right)^2, \quad (2.14)$$

$$E_G'' = E_{*G}'' \cdot \frac{U_n}{U_{\bar{o}i}}$$

- для трансформаторов:

$$X_T = \frac{U_k \cdot S_{\bar{o}}}{100 \cdot S_n} \cdot \left(\frac{U_n}{U_{\bar{o}i}} \right)^2 \quad (2.15)$$

- для реактора:

$$X_P = X_p \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}i}^2} \quad (2.16)$$

- для линии:

$$X_{Л} = X_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}i}^2} \quad (2.17)$$

- для системы:

$$E_C'' = E_{*C}'' \cdot \frac{U_{cpi}}{U_{\bar{o}i}} \quad (2.18)$$

где: $U_{\bar{o}i}$, U_{cpi} - базисное напряжение (кВ) и среднее напряжение (кВ) той ступени i , на которой находится рассматриваемый элемент. Приведенные формулы можно использовать для пересчета величины как основной, так и на всех других ступенях трансформации, только очевидно, что для основной ступени не требуется производить приведение базисных единиц (величин).

Для определения сопротивления двухобмоточного трансформатора можно брать любую его обмотку, т.е. высокую или низкую. Тогда:

U_n - номинальное напряжение выбранной обмотки, кВ; $U_{\bar{o}i}$ - базисное напряжение той ступени, на которой выбрана обмотка, кВ.

Составление схемы замещения по приближенному приведению, используя относительные единицы

При составлении схемы придерживаются следующей последовательности:

1. Расчетная схема делится на ступени трансформации;
 2. Для каждой ступени напряжения i устанавливается среднее напряжение U_{cpi} согласно шкале средних номинальных напряжений (см. выше).

3. Выбирается произвольно базисная мощность $S_{\bar{o}}$, которая во всех ступенях трансформации одинакова. Рекомендуется принимать $S_{\bar{o}} = 100; 1000$ МВА и т.д.

4. Для каждой ступени i принимается базисное напряжение $U_{\bar{o}i} = U_{cpi}$, и определяется базисный ток

(2.19)

$$I_{\bar{o}i} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}i}}$$

5. Определяется ЭДС и сопротивление элементов расчетной схемы при базисных условиях:

- для генераторов:

$$X_d'' = X_d'' \cdot \frac{S_{\bar{o}} \cdot \cos(\varphi)}{P_n} \quad (2.20)$$

$$E_G'' = E_{*G}''$$

- для трансформаторов:

$$X_T = \frac{U_k \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_n} \quad (2.21)$$

- для реактора:

$$X_P = X_p \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}i}^2} \quad (2.22)$$

- для линии:

$$X_{Л} = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}i}^2} \quad (2.23)$$

- для системы С:

$$E_C'' = E_{*C}'' \quad (2.24)$$

Определение аналитическим способом сверхпереходного, ударного и наибольшего действующего значения тока в месте трехфазного короткого замыкания.

1. Для вычисления начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания. нужно составить схему замещения, введя в нее генераторы с их параметрами, характеризующими сверхпереходный режим: сверхпереходным сопротивлением X_d'' и сверхпереходной ЭДС E_G'' . Остальные элементы расчетной схемы вводят их эквивалентными сопротивлениями, а в системе С, кроме того и ЭДС E_C .

На схеме замещения все сопротивления обозначают порядковыми номерами, а под чертой указывают их величины в относительных единицах.

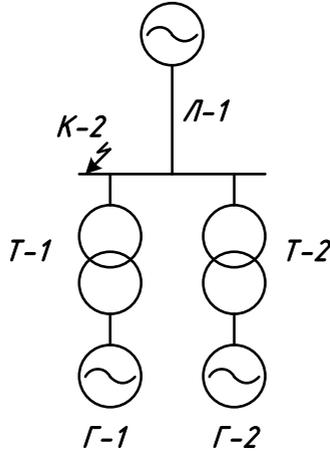


Рис. 2.1. Исходная схема для расчета токов короткого замыкания

На рис.2.1. показана схема замещения, составленная для расчетной точки короткого замыкания. К-2. В схему замещения не вошли кабельная линия 6-10 кВ и воздушная линия Л-2, трансформатор собственных нужд Т-3 и реактор Р.

2. Схема замещения (рис.2.2, а) преобразуется к простейшему виду (рис.2.2, б). При преобразовании система С выделяется в отдельную ветвь. Если в схеме генераторы имеют одинаковые параметры и находятся в одинаковых условиях, по отношению к точке короткого замыкания, то их можно заменить одним эквивалентным генератором суммарной мощности. При этом в схеме замещения эти генерирующие ветви следует сложить параллельно.

Преобразование (свертывание) схемы производится в направлении от источников питания к месту короткого замыкания. При этом используются известные правила последовательного и параллельного сложения сопротивлений, преобразование треугольника в эквивалентную звезду или обратно и т.п.

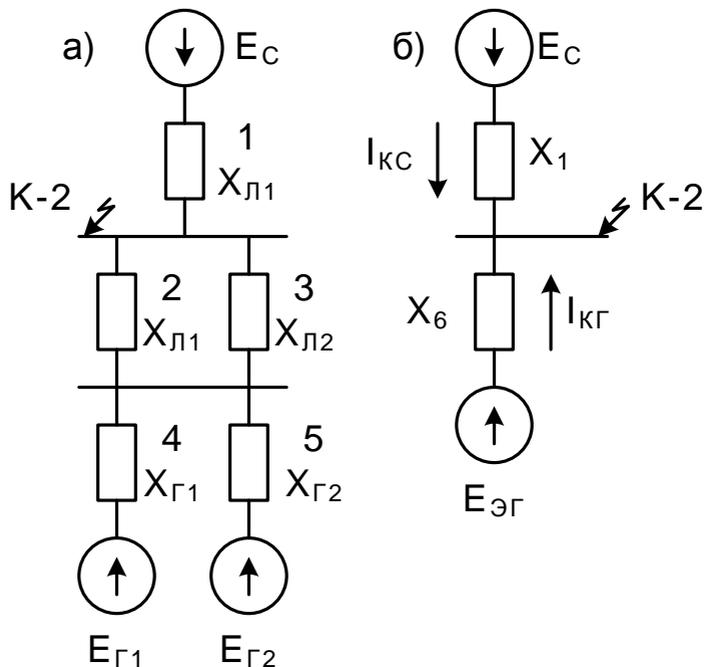


Рис. 2.2. Схемы замещения для расчета токов короткого замыкания:
 а) исходная схема замещения; б) упрощенная схема

Например:

а) определение результирующего сопротивления последовательно соединенных n элементов (например, X_1, X_2, \dots, X_n):

$$X_{\Sigma} = X_1 + X_2 + \dots + X_n \quad (2.25)$$

б) определение результирующего сопротивления при параллельном соединении элементов:

$$X_{\Sigma} = \frac{I}{\frac{I}{X_1} + \frac{I}{X_2} + \dots + \frac{I}{X_n}} \quad (2.26)$$

В частных случаях имеем:

- для двух ветвей

$$X_{\Sigma} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} \quad (2.27)$$

- для трех ветвей:

$$X_{\Sigma} = \frac{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3}{X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3 + X_2 \cdot X_3} \quad (2.28)$$

в) замена n генерирующих ветвей, подключенных к общему узлу (т.е. соединенных последовательно) одной эквивалентной ветвью:

$$E_{\Sigma} = \frac{\sum_1^n E_i \cdot Y_i}{\sum_1^n Y_i} \quad (2.27)$$

где: i -номер ветвей; n -число ветвей.

В частном случае для двух генерирующих ветвей имеем:

$$E_{\Sigma} = \frac{E_1 \cdot X_2 + E_2 \cdot X_1}{X_1 + X_2} \quad (2.28)$$

г) преобразование сопротивлений X_1, X_2, X_3 , соединенных в звезду, в эквивалентный треугольник с сопротивлениями X_{12}, X_{23}, X_{13} и наоборот:

$$\begin{aligned} X_{12} &= X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}, \\ X_{13} &= X_1 + X_3 + \frac{X_1 \cdot X_3}{X_2}, \\ X_{23} &= X_2 + X_3 + \frac{X_2 \cdot X_3}{X_1}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

д) преобразование сопротивлений X_{12}, X_{23}, X_{13} соединенных в треугольник, в эквивалентную звезду с сопротивлениями X_1, X_2, X_3 :

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{X_{12} \cdot X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}, \\ X_2 &= \frac{X_{12} \cdot X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}, \\ X_3 &= \frac{X_{13} \cdot X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

3. Величина сверхпереходного тока (начального значения периодической составляющей тока) в месте короткого замыкания можно определить как сумму токов всех источников, притекающих к месту короткого замыкания.

$$I_k'' = \sum_1^n I_{ki} \quad (2.31)$$

где: i - номер ветвей; n - число ветвей.

Например, ток от генераторных ветвей (см. рис. 2.2, б), выраженный в относительных единицах:

$$I_{*KG}'' = \frac{E_{\Delta\Gamma}''}{X_6} \quad (2.32)$$

Ток от системы С, выраженный в относительных единицах:

$$I_{*KC}'' = \frac{E_C''}{X_1} \quad (2.33)$$

где: $X_6 = \frac{X_2 \cdot X_3}{X_2 + X_3} + \frac{X_4 \cdot X_5}{X_4 + X_5}$.

Сверхпереходной ток в месте короткого замыкания, выраженный в именованных единицах:

$$I_k'' = (I_{*KG}'' + I_{*KC}'') \cdot I_{\delta} \quad (2.34)$$

где I_{δ} - базисный ток ступени, на которой находится точка короткого замыкания, кА.

4. Ударный ток и наибольшее действующее значение тока короткого замыкания определяются начальным периодическим током I_{ki}'' и ударным коэффициентом K_{yi} ветвей источников:

$$i_{y0} = \sqrt{2} \cdot \sum_1^n K_{yi} \cdot I_{ki}''; \quad (2.35)$$

$$I_y = \sum_1^n I_{ki}'' \cdot \sqrt{1 + 2(K_{yi} - 1)^2}.$$

Усредненные значения ударного коэффициента для характерных ветвей системы:

- для генераторной ветви $K_y = 1,94 \div 1,98$;

-для ветви системы, связанной с шинами, где рассматривается короткое замыкание, воздушными линиями напряжением 35-220 кВ -
 $K_y = 1,608 \div 1,78$;

-для ветви системы, связанной со сборными шинами 6-10 кВ, где рассматривается короткое замыкание, через трансформатор
 $K_y = 1,82 \div 1,93$;

Например, ударный ток и наибольшее действующее значение тока в месте короткого замыкания в схеме (см. рис. 2.2, б) вычисляем в виде, кА:

$$\dot{i}_{y\delta}'' = \sqrt{2} \cdot (K_{y\delta} \cdot I_{*KG}'' + K_{y\delta} \cdot I_{*KC}'') \cdot I_{\delta} \quad (2.36)$$

$$I_y'' = (I_{*KG}'' \cdot \sqrt{1 + 2(K_{yG} - 1)^2} + I_{*KC}'' \cdot \sqrt{1 + 2(K_{yC} - 1)^2}) \cdot I_{\delta}$$

где: K_{yG} - ударный коэффициент ветви генератора; K_{yC} - ударный коэффициент ветви системы С; I_{δ} - базисный ток той ступени, на которой находится точка короткого замыкания, кА.

*Расчет периодической слагающей тока в
месте трехфазного к.з. методом типовых кривых*

Метод типовых кривых основан на использовании кривых изменения во времени отношения тока короткого замыкания от генераторов в произвольный момент времени I_{r1} к начальному значению этого тока I_{ro} при различных удаленностях точки короткого замыкания (рис.2.3). Последнее характеризуется величиной начального относительного тока машины $I_{*ro(n)}$.

Если в рассматриваемой схеме электроснабжения имеется источник бесконечной мощности (система С) и несколько генераторов, находящихся в неодинаковых условиях по отношению к точке короткого замыкания, то расчет токов производится по способу индивидуального учета изменения периодической слагающей тока короткого замыкания источников.

При этом способе определения токов короткого замыкания метод типовых кривых следует применять только для определения токов от генераторных ветвей и когда генераторы будут находиться при сравнительно небольших удаленностях от точки короткого замыкания. Последнее определяется условием $I_{*ro(n)} > I$. При $I_{*ro(n)} < I$.

Ток генератора (или эквивалентного генератора, объединяющего несколько генераторов) практически не изменится во времени, поэтому этот генератор (эквивалентный генератор) и остальную часть схемы целесообразно заменить одним источником с неизменной по амплитуде ЭДС (называемой «система С»).

Методика расчета токов короткого замыкания с помощью типовых кривых заключается в следующем:

1. Для расчетной схемы рассматриваемой точки короткого замыкания составляется схема замещения, в которую генераторы входят сверхпереходным сопротивлением X_d'' и сверхпереходной ЭДС E_G'' . Составление схемы замещения производится методом приближенного приведения, используя относительные единицы (по условию задания).

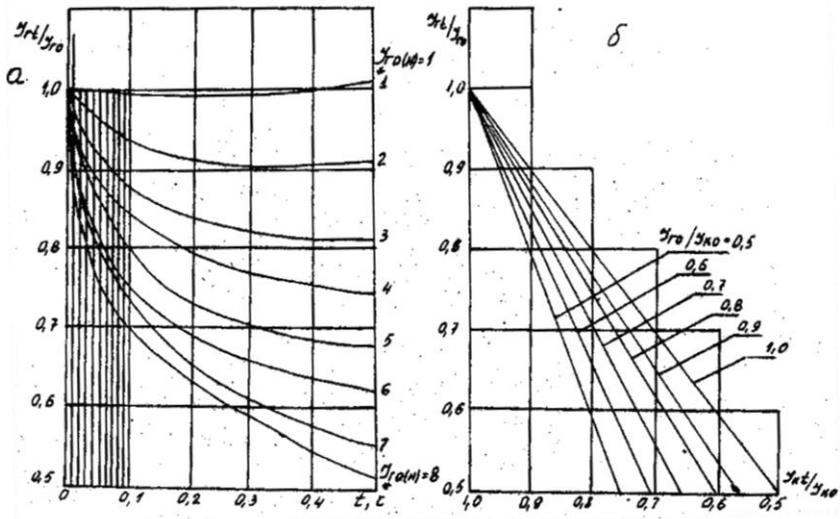


Рис. 2.3. Кривые изменения во времени тока короткого замыкания от синхронной машины (а) и зависимости тока в месте короткого замыкания от тока генератора (б).

2. Сворачивая, схему замещения относительно точки короткого замыкания, приводя ее к наиболее простому виду. Здесь может быть два случая:

- когда источники образуют по отношению к точке короткого замыкания как независимые друг от друга источники (рис. 2.4, а,б);
- когда источники связаны с точкой короткого замыкания через общее сопротивление $X_{общ}$ (рис.2.4, в).

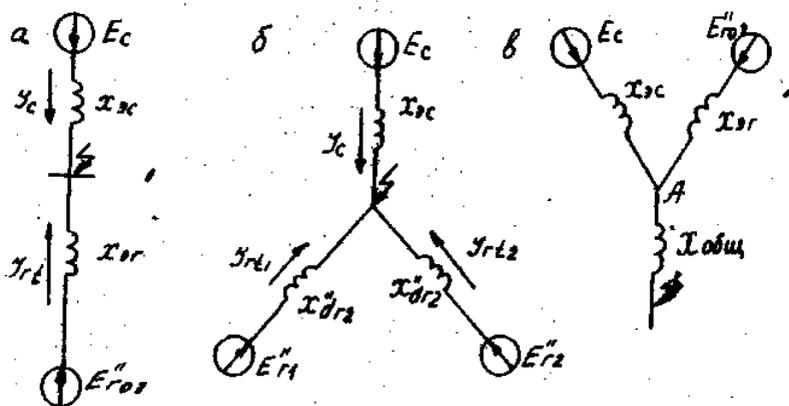


Рис.2.4. Упрощенная схема для определения токов короткого замыкания: а, б - когда источники связаны с точкой короткого замыкания как независимые друг от друга источники; в - когда источники связаны с точкой короткого замыкания через общее сопротивление

Покажем определение тока в месте короткого замыкания в упрощенной схеме (см. рис. 2.4, а):

а) определяется начальный ток короткого замыкания от эквивалентного генератора:

$$I_{ro} = \frac{E_{ro2}}{X_{эр}} \quad (2.37)$$

где: $X_{эр}$ - результирующее сопротивление схемы между ЭДС генераторов и точкой короткого замыкания; E_{ro2} - эквивалентная ЭДС генераторов системы;

б) определяется начальный относительный ток эквивалентного генератора:

$$I_{*ro(n)} = I_{ro} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{н\Sigma}} \quad (2.38)$$

где: $S_{н\Sigma}$ - суммарная номинальная мощность генераторов системы, МВА;

в) исходя из найденного значения $I_{*ro(n)}$ на рис. 2.3, а) выбирают соответствующую кривую и по этой кривой для нужного момента

та времени находят отношение тока короткого замыкания в этот момент к начальному значению тока, т.е.:

$$I_{rt} / I_{ro} = \gamma_t; \quad (2.39)$$

г) по найденному отношению γ_t определяют искомое значение периодической составляющей тока короткого замыкания от генератора в момент времени t .

$$I_{rt} = \gamma_t \cdot I_{ro} \quad (2.40)$$

Этот ток получается выраженным в тех же единицах, что и ток I_{ro} , т.е. в относительных базисных единицах при выбранных базисных условиях. Чтобы получить искомый ток I_{rt} в именованных единицах, кА, воспользуемся выражением:

$$I_{rt} = I_{*rt} \cdot I_{\delta} \quad (2.41)$$

где: I_{δ} - базисный ток на ступени короткого замыкания, кА;

д) определяется действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания от системы в именованных единицах, кА,

$$I_c = (E_c / X_c) \cdot I_{\delta} \quad (2.42)$$

где: E_c и X_c - ЭДС системы С и результирующее сопротивление схемы от точки приложения ЭДС E_c до точки короткого замыкания, выраженные в относительных единицах при выбранных базисных условиях, I_{δ} - базисный ток на ступени короткого замыкания, кА;

е) определяется значение периодической слагающей, тока в месте короткого замыкания:

$$I_k = I_{rt} + I_c \quad (2.43)$$

Покажем теперь определение тока в месте короткого замыкания в упрощенной схеме (рис. 2.4, б):

а) определяется начальный ток короткого замыкания от 1-го и 2-го генератора:

$$\begin{aligned} I_{ro1} &= \frac{E_{ro1}}{X_{r1}}; \\ I_{ro2} &= \frac{E_{ro2}}{X_{r2}}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

б) определяется начальный ток каждого генератора:

$$\begin{aligned}
 I_{*r01(n)} &= I_{r01} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H1}}; \\
 I_{*r02(n)} &= I_{r02} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H2}}.
 \end{aligned}
 \tag{2.45}$$

где: S_{H1} , S_{H2} - номинальная мощность, соответственно 1-го и 2-го генератора, МВА;

в) по найденному значению $I_{*r01(n)}$ и $I_{*r02(n)}$ (рис. 2.3, а) выбирают соответствующие им кривые и по этим кривым для нужного момента времени t находят отношения:

$$\begin{aligned}
 \frac{I_{rt1}}{I_{t01}} &= \gamma_{t1}; \\
 \frac{I_{rt2}}{I_{t02}} &= \gamma_{t2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.46}$$

г) по найденным отношениям определяют искомые периодические токи генераторов в момент времени t :

$$\begin{aligned}
 I_{*rt1} &= \gamma_{t1} \cdot I_{r01}; \\
 I_{*rt2} &= \gamma_{t2} \cdot I_{r02}.
 \end{aligned}
 \tag{2.47}$$

д) вычисляется периодический ток от системы С:

$$I_{*c} = \frac{E_{*c}}{X_{*c}}
 \tag{2.48}$$

где: E_{*c} и X_{*c} - ЭДС системы С и результирующее сопротивление схемы между точкой приложения ЭДС E_{*c} и точкой короткого замыкания, выраженные в относительных единицах при выбранных базисных условиях;

е) определяется суммарный периодический ток в месте короткого замыкания для заданного момента времени t в именованных единицах, кА:

$$I_K = (I_{*rt1} + I_{*rt2} + I_{*c}) \cdot I_{\bar{\sigma}}
 \tag{2.49}$$

где $I_{\bar{\sigma}}$ - базисный ток той ступени, на которой находится точка короткого замыкания, кА.

Если генераторы имеют $I_{*r0(n)} > I$ и связаны с точкой короткого замыкания через общее сопротивление $X_{общ}$. (см. рис. 2.4, в), то изменения во времени тока генераторов приводят не только к начальному значению этого тока, но и к изменению тока от системы. Степень изменения тока в месте короткого замыкания к любому моменту вре-

мени приближенно можно определить по специальным кривым $\frac{I_{kt}}{I_{ko}} = f\left(\frac{I_{rt}}{I_{ro}}\right)$ построенным для разных отношений I_{ro}/I_{ko} в пределах от 1 до 0,5. Такие кривые приведены на рис. 2.3, б. Нижний предел отношения I_{ro}/I_{ko} принят равным 0,5 потому, что при $I_{ro}/I_{ko} < 0,5$ изменением со времени тока короткого замыкания можно пренебречь.

Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания в упрощенной схеме (см. рис. 2.4, в) выполняют в следующей последовательности:

а) определяют суммарное индуктивное сопротивление и суммарную ЭДС всей схемы:

$$\begin{aligned} X_{\Sigma} &= X_{\text{общ}} + \frac{X_{\text{ЭС}} \cdot X_{\text{ЭГ}}}{X_{\text{ЭС}} + X_{\text{ЭГ}}}; \\ E_{\Sigma} &= \frac{E_c \cdot X_{\text{ЭГ}} + E_{ro} \cdot X_{\text{ЭС}}}{X_{\text{ЭГ}} + X_{\text{ЭС}}}. \end{aligned} \quad (2.50)$$

где: $X_{\text{ЭГ}}$, $X_{\text{ЭС}}$ - результирующее сопротивление элементов, соответственно, от точки приложения ЭДС генераторов и системы до узловой точки А;

б) определяют начальный ток в месте короткого замыкания:

$$I_{ko} = \frac{E_{\Sigma}}{X_{\Sigma}} \quad (2.51)$$

в) находят начальный ток генераторной ветви:

$$I_{ro} = \frac{E_{ro} - I_{ko} \cdot X_{\text{общ}}}{X_{\text{ЭГ}}} \quad (2.52)$$

г) определяют отношение I_{ro}/I_{ko} и начальный относительный ток эквивалентного генератора

$$I_{*ro(n)} = I_{ro} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_n} \quad (2.53)$$

где: S_n - суммарная мощность 1-го и 2-го генератора, МВА;

д) исходя из найденного значения $I_{*ro(n)}$, на (рис.2.3, а) выбирают соответствующую кривую, а по этой кривой для, нужного момента времени находят отношение $I_{rt}/I_{ro} = \gamma_t$;

е) исходя из найденного значения отношения I_{ro}/I_{ko} на рис.2.3, б выбирают соответствующую кривую и по этой кривой и по вычисленному отношению γ_t находят отношение $I_{kt}/I_{ko} = \gamma_{kt}$;

ж) определяют искомый периодический ток в месте короткого замыкания для момента времени t $I_k = I_{kt} = \gamma_{kt} \cdot I_{*ko} \cdot I_{\sigma}$, кА.

3. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Порядок расчета токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях

1. Для рассматриваемой точки несимметричного короткого замыкания составляется схема замещения для токов прямой последовательности. Затем, упрощая схему относительно точки короткого замыкания, определяют суммарные сопротивление X_{Σ} и эквивалентную ЭДС E_{Σ} схемы.

2. Составляется схема замещения для токов обратной последовательности. Затем упрощая схему относительно точки короткого замыкания определяют ее суммарное сопротивление обратной последовательности $X_{2\Sigma}$.

3. Составляется схема замещения для токов нулевой последовательности. Затем, упрощая схему относительно точки короткого замыкания, определяют ее суммарное сопротивление нулевой последовательности $X_{o\Sigma}$.

4. Определяется сопротивление шунта короткого замыкания для различных видов короткого замыкания $\Delta X^{(n)}$ где: n - показатель вида короткого замыкания.

5. Определяется величина тока прямой последовательности для рассматриваемых видов короткого замыкания.

6. Определяются искомые фазные токи и напряжения в месте рассматриваемых видов короткого замыкания либо аналитическим

способом, либо построением векторных диаграмм токов и напряжений.

7. При необходимости определяют: величину тока в земле или в нейтрали элемента (генератора, трансформатора); симметричные составляющие токов и напряжений в месте короткого замыкания и их распределение в схеме соответствующих последовательностей и т.п.

*Определение токов прямой последовательности
в месте несимметричного короткого замыкания*

1. Составляется схема замещения для токов прямой последовательности. Эта схема является обычной схемой, которую составляют для расчета токов при трехфазном коротком замыкании, т.к. последние являются токами прямой последовательности. Далее, упрощая схему относительно рассматриваемой точки несимметричного короткого замыкания, определяют ее эквивалентную ЭДС E_{Σ} и суммарное сопротивление X_{Σ} . Конечная схема имеет вид, показанный на рис. 3.1.

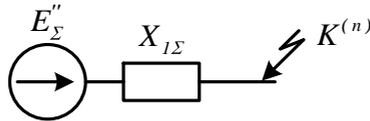


Рис 3.1. Упрощенная схема прямой последовательности

2. Составляется схема замещения для токов обратной последовательности. Схема состоит из трех элементов, как и схема прямой последовательности, т.к. токи прямой и обратной последовательностей протекают по одним и тем же путям.

Отличие: точки приложения ЭДС источников заземляются, т.к. ЭДС обратной последовательности генерирующих ветвей условно принимают равными нулю ($E_2 = 0$);

а) генераторы замещаются со своими сопротивлениями обратной последовательности X_2 . (Сопротивление X^*d заменяется сопротивлением X_2).

В данной работе можно принять $X_2 = X_d''$.

Сопротивление трансформаторов, линии и реактора прямой и обратной последовательностей равны.

Далее упрощая схему относительно точки несимметричного короткого замыкания определяют ее суммарное сопротивление $X_{2\Sigma}$. Конечная схема имеет вид, показанный на рис. 3.2.

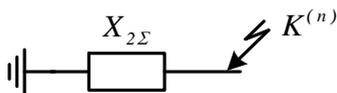


Рис. 3.2. Упрощенная схема обратной последовательности

3. Составляется схема замещения для токов нулевой последовательности.

Схема существенно отличается от схемы прямой и обратной последовательности, т.к. токи нулевой последовательности протекают по путям, отличным от путей протекания токов при трехфазном коротком замыкании.

Токи нулевой последовательности, протекая от места короткого замыкания, могут иметь возврат к месту короткого замыкания только через землю и параллельные ей цепи (тросы линий, оболочка кабелей, нулевые провода). Поэтому, приступая к составлению схемы, прежде всего, необходимо установить возможные контуры протекания тока нулевой последовательности. Для образования таких контуров необходимо чтобы в цепи, электрически связанной с точкой короткого замыкания, имелись заземленные нейтрали элемента (генератора, трансформатора).

Составление схемы следует начинать от точки короткого замыкания. Вид этой схемы зависит от количества трансформаторов и схемы соединений их обмоток.

Например, рассмотрим трансформатор, имеющий соединение обмоток Y/Δ . Пусть этот трансформатор на участок сети включен, как на рис.3.3.

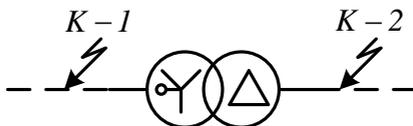


Рис. 3.3. Вариант включения трансформатора в сеть

Если точка короткого замыкания $K-1$ со стороны обмотки, соединенной в заземленную звезду, то образуется циркуляция тока нулевой последовательности: через точки короткого замыкания попадает в

землю, затем в нейтраль обмотки ВН трансформатора, далее по трем фазам обмотки ВН, линии и обратно к точке короткого замыкания. Кроме того, во вторичной обмотке соединенной в треугольник трансформатора наводится ЭДС нулевой последовательности и так как фазы этой обмотки соединены в треугольник, то в них возникает ток нулевой последовательности, не выходящий за пределы треугольника.

Таким образом, в случае короткого замыкания в точке К-1 в схему нулевой последовательности войдет сам трансформатор и элементы от схемы точки короткого замыкания до этого трансформатора, т.е. в схему должны войти все элементы, по которым пойдет ток нулевой последовательности.

Если точка короткого замыкания К-2 со стороны обмотки, соединенной в треугольник то сам трансформатор и элементы от точки короткого замыкания до этого трансформатора в схему не войдет, т.к. через обмотки соединенной в треугольник, ток нулевой последовательности не образуется.

Сопротивление нулевой последовательности определяется схемой обмоток.

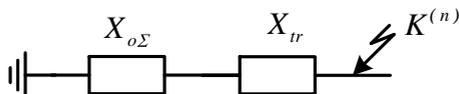


Рис. 3.4. Схема замещения нулевой последовательности

При учете трансформатора в схеме нулевой последовательности его сопротивление можно принимать, исходя из данных таблицы 3.1.

Таблица 3.1

Типы соединения обмоток трансформатора и их сопротивления нулевой последовательности

Тип трансформатора и соединение его обмоток	Сопротивление нулевой последовательности	Рис.
1	2	3
<i>Двухобмоточные</i>		
1. Тр-р любого типа с соединением обмоток Υ / Δ	$x_0 = x_1 \quad (x\mu_0 = \infty)$	а)

Продолжение табл. 3.1

1	2	3
2. Трехфазная группа из трех однофазных тр-ров или трехфазный тр-р с 4 или 5 сердечниками (четыре или пяти стержневой) с соединением обмоток Υ / Υ Υ / Υ	$x_0 = \infty \quad (x\mu_0 = \infty)$ $x_0 = x_I \quad (x\mu_0 = \infty)$	в) б)
3. Трехфазный трестержневой тр-р с соединением обмоток Υ / Υ Υ / Υ	$x_0 = x_I + x\mu_0 \quad (x\mu_0 = 0.3 \div I)$ $x_0 = x_I$	в) б)
<i>Трехобмоточные</i>		
4. Трехобмоточные тр-ры с соединением обмоток $\Upsilon / \Delta / \Upsilon$ $\Upsilon / \Delta / \Upsilon$ $\Upsilon / \Delta / \Delta$	$x_0 = x_I + x_{II}$ Определяется по своей схеме $x_0 = x_I + \frac{x_{II} \cdot x_{III}}{x_{II} + x_{III}}$	з) д)
5. Двухобмоточные с расщепленной обмоткой НН на две $\Upsilon / \Delta / \Delta$	$x_0 = x_I + \frac{x_{II} \cdot x_{III}}{x_{II} + x_{III}}$	е)
<i>Автотрансформаторы</i>		
$\Upsilon / \Upsilon / \Delta$	Определяется по своей схеме	ж)
<i>Линии</i>		
Характеристика линии	Отношение x_0/x_I	x_0 , Ом/км
Одноцепная без тросов	3,5	1,4
Одноцепная со стальными тросами	3,0	0,8
Одноцепная с хорошо проводящими тросами (из цветного металла)	2,0	-
Двухцепная без тросов	5,5	1,1

Окончание табл. 3.1

1	2	3
Двухцепная со стальными тросами	4,7	0,6
Двухцепная с хорошо проводящими тросами	3,0	-
<i>Кабели</i>		
Трехжильные	$x_0 = (3,5 \text{ ч } 4,6) \cdot x_1$	$r_0 = 10 \cdot r_1$
Одножильные	$x_0 = (0,8 \text{ ч } 1,0) \cdot x_1$	$r_0 = 10 \cdot r_1$
<i>Реакторы</i>		
	$x_0 = x_1$	$r_0 = r_1$

Расчет режима сети при несимметричном коротком замыкании основан на использовании метода симметричных составляющих, в соответствии с которым фазные токи и напряжения определяется как геометрическая сумма токов или напряжений, обратной и нулевой последовательности.

Учитывая, что полный ток в месте коротком замыкании, а также токи обратной и нулевой последовательности при несимметричном коротком замыкании пропорциональны току прямой последовательности, основная задача расчета несимметричных коротких замыканий заключается в определении тока прямой последовательности. Расчетные выражения, приведенные ниже определяют токи и напряжения отдельных последовательностей для особой фазы (фазы А).

Для определения тока требуется предварительно найти результирующие реактивные сопротивления схем обратной и нулевой последовательности и дополнительное сопротивление зависящее от вида коротком замыкании.

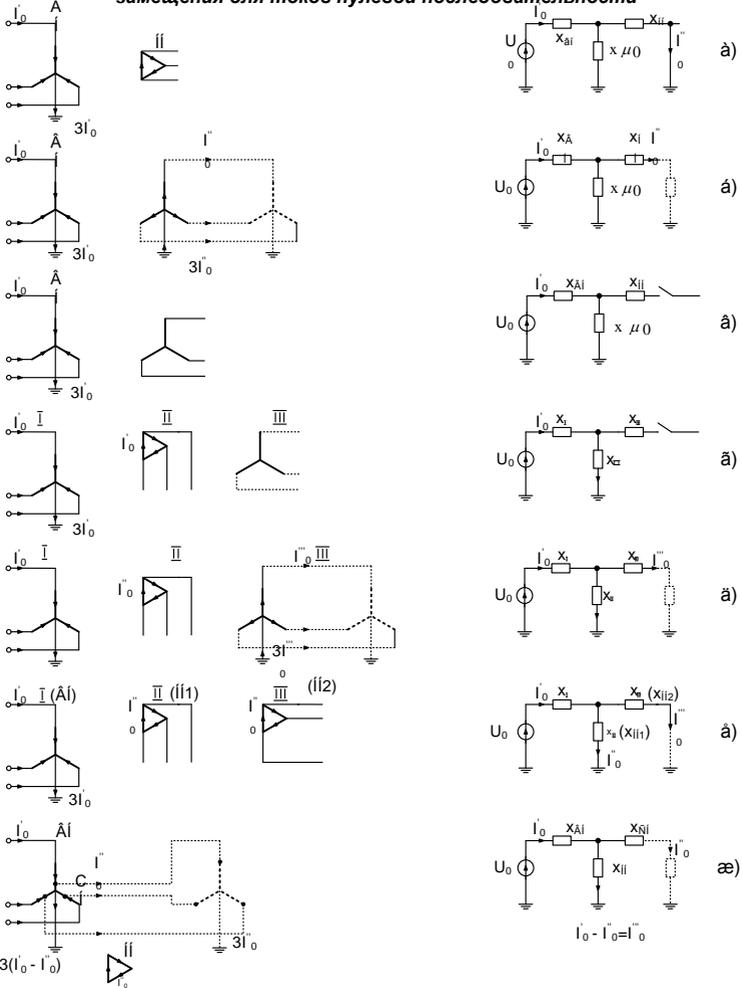
$$\Delta X^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} \text{ - для однофазного короткого замыкания;}$$

$$\Delta X^{(2)} = X_{2\Sigma} \text{ - для двухфазного короткого замыкания;}$$

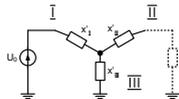
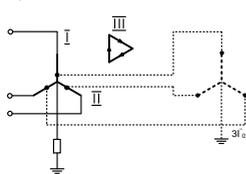
$$\Delta X^{(1,1)} = X_{2\Sigma} \parallel X_{0\Sigma} \text{ - для двухфазного короткого замыкания}$$

на землю.

Основные варианты соединения обмоток трансформаторов и схемы их замещения для токов нулевой последовательности



- 1) $x_{\mu 0}$ - реактивное сопротивление намагничивания нулевой последовательности
- 2) активными сопротивлениями пренебрегаем



$$\begin{aligned} \Upsilon / \Upsilon / \Delta \quad \Upsilon \\ x'_I &= x_I + 3 \cdot x_N \cdot \left(1 - \frac{U_I}{U_2}\right) \\ x'_{II} &= x_{II} + 3 \cdot x_N \cdot \left(\frac{U_I - U_2}{U_2^2}\right) \cdot U_I \\ x'_{III} &= x_{III} + 3 \cdot x_N \cdot \frac{U_I}{U_2} \end{aligned}$$

Начальное значение тока прямой последовательности определяется по формуле:

$$I''_{nI^*} = \frac{E''_{\Sigma}}{X_{I\Sigma} + \Delta X^{(n)}} \quad (3.1)$$

Ток обратной последовательности для однофазного короткого замыкания:

$$I_{KA2} = I_{KA1} \quad (3.2)$$

Ток нулевой последовательности для однофазного короткого замыкания:

$$I_{KA0} = I_{KA1} \quad (3.3)$$

Ток обратной последовательности для двухфазного короткого замыкания:

$$I_{KA2} = -I_{KA1} \quad (3.4)$$

Ток нулевой последовательности для двухфазного короткого замыкания:

$$I_{KA0} = 0 \quad (3.5)$$

Ток обратной последовательности для двухфазного короткого замыкания на землю:

$$I_{KA2} = -I_{KA1} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{0\Sigma} + X_{2\Sigma}} \quad (3.6)$$

Ток нулевой последовательности для двухфазного короткого замыкания на землю:

$$I_{KA0} = -I_{KA1} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{0\Sigma} + X_{2\Sigma}} \quad (3.7)$$

Модуль полного тока в месте короткого замыкания определяется как:

$$I_n''^{(n)} = m^{(n)} I''_{nI^*} I_{\delta} \quad (3.8)$$

где: $m^{(n)}$ - коэффициент, зависящий от вида короткого замыкания;

$m^{(1)} = 3$ - для однофазного короткого замыкания;

$m^{(2)} = \sqrt{3}$ - для двухфазного короткого замыкания;

Причём для двухфазного короткого замыкания на землю:

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} \quad (3.9)$$

Напряжения отдельных последовательностей в месте короткого замыкания определяется в соответствии с уравнениями второго закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} U_{k1}^{(n)} &= E_{\Sigma} - jX_{1\Sigma} I_{n1}^{(n)} \\ U_{k2}^{(n)} &= 0 - jX_{2\Sigma} I_{n2}^{(n)} \\ U_{k0}^{(n)} &= 0 - jX_{0\Sigma} I_{n0}^{(n)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Составляющая напряжение прямой последовательности может быть также определена по известному значению дополнительного сопротивления.

$$U_{KA1} = j\Delta X^{(n)} \cdot I_{KA1} \quad (3.11)$$

Составляющие напряжений отдельных последовательностей в заданном узле схемы (шины СН автотрансформатора) удобно определять суммированием (с учетом знаков) напряжений соответствующих последовательностей в месте короткого замыкания и падений напряжений в сопротивлениях, включенных в схемах каждой последовательности между точкой короткого замыкания интересующим узлом m , по соотношениям:

$$\begin{aligned} U_{1(n)}^{(n)} &= U_{k1}^{(n)} + jX_{1km} I_{1km}^{(n)} \\ U_{2(n)}^{(n)} &= U_{k2}^{(n)} + jX_{2km} I_{2km}^{(n)} \\ U_{0(n)}^{(n)} &= U_{k0}^{(n)} + jX_{0km} I_{0km}^{(n)} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Здесь $I_{1km}^{(n)}$, $I_{2km}^{(n)}$, $I_{0km}^{(n)}$ - токи сопутствующих последовательностей, протекающие по сопротивлениям X_{1km} , X_{2km} , X_{0km}

Определение токов и напряжений отдельных последовательностей следует вести в именованных единицах: напряжений – в кВ, токов – в кА. При этом перевод сопротивлений в именованные единицы следует выполнять по формуле:

$$X_{(Om)} = X_{*} \frac{U_{HK}^2}{S_{\delta}} \quad (3.13)$$

Во избежание ошибки следует помнить, что напряжение прямой последовательности увеличивается по мере удаления от точки к.з, а напряжения обратной последовательностей – уменьшается.

Определение фазных величин и построение векторных диаграмм

Найденные в предыдущем расчете значения определяют токи и напряжения отдельных последовательностей для особой фазы (фазы А). Для определения токов и напряжения в других фазах используется оператор поворота $a = e^{i120^\circ}$ и $a^2 = e^{i240^\circ}$.

Например, для напряжений фаз В и С имеем:

$$\begin{aligned} U_{KB}^{(n)} &= a^2 U_{K1}^{(n)} + a U_{K2}^{(n)} + U_{K0}^{(n)} ; \\ U_{KC}^{(n)} &= a U_{K1}^{(n)} + a^2 U_{K2}^{(n)} + U_{K0}^{(n)} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Ток, протекающий в земле при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$, определяются как

$$I_3 = 3I_{n0}^{(n)} \quad (3.15)$$

По полученным значениям симметричных составляющих строятся векторные диаграммы токов и напряжений как отдельных последовательностей, так и полных величин. Построение векторных диаграмм следует произвести для точки короткого замыкания. Кроме того, строятся векторные диаграммы напряжений.

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНОГО И НЕСИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Таблица 4.1

Характеристики ЛЭП

Длина линий, км				Удельные параметры, Ом/км	
<i>Л1</i>	<i>Л2</i>	<i>Л3</i>	<i>Л4</i>	X_{y0}	R_{y0}
160	200	260	30	0,36	0,07

Таблица 4.2

Состояние нейтрали трансформаторов

P1	P2	P3	P4	P5
-	-	-	x	x

Таблица 4.3

Технические данные элементов электрической сети

Станция 1												
Турбогенераторы						Трансформаторы				Реакторы		
$P_n, \text{Мвт}$	$\cos \varphi_n$	x_d	X''_d	X_2	x''_d/R	S_n, MVA	$U_{вн}, \text{кВ}$	$U_k, \%$	X/R	$U_{ном}, \text{кВ}$	$X_p, \text{Ом}$	X_p/R
100	0,85	2,4	0,183	0,223	100	125	242	11	30	10	0,45	80
Станция 2												
Турбогенераторы						Трансформаторы						
n	$P_n, \text{МВт}$	$\cos \varphi$	x_d	x''_d	x_2	x''_d/R	S_n, MVA	$U_{вн}, \text{кВ}$	$U_k, \%$	X/R		
3	500	0,8	2,2	0,28	0,25	150	630	242	10,5	50		
Станция 3												
Турбогенераторы						Трансформаторы						
n	$P_n, \text{МВт}$	$\cos \varphi$	x_d	x''_d	x_2	x''_d/R	S_n, MVA	$U_{вн}, \text{кВ}$	$U_k, \%$	X/R		
8	171	0,85	1,12	0,27	0,28	50	200	242	11	0		
Станция 3												
Автотрансформатор							Система		H1	H2	H3	
S, MVA	$U_{вн}, \text{кВ}$	$U_{сн}, \text{кВ}$	$U_{кв-н}$	$U_{кв-н}$	$U_{кв-с}$	X/R	S_c, MVA	S, MVA	S, MVA	S, MVA		
500	500	230	35	22	11	50	4500	1000	200	880		

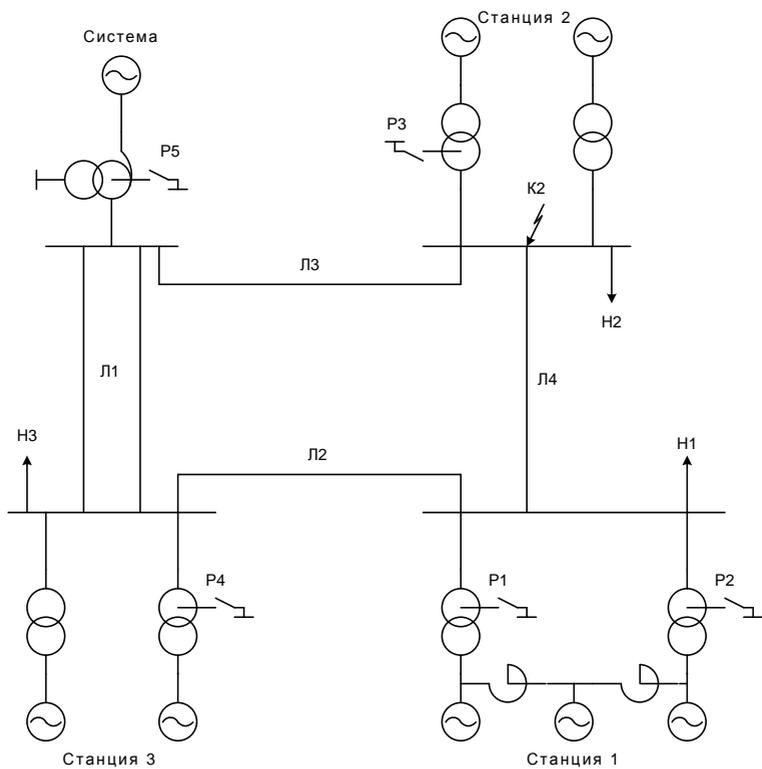


Рис. 4.1. Принципиальная схема

4.1. Определение параметров элементов, составление и преобразование схем замещения.

4.1.1. Составляем схему замещения.

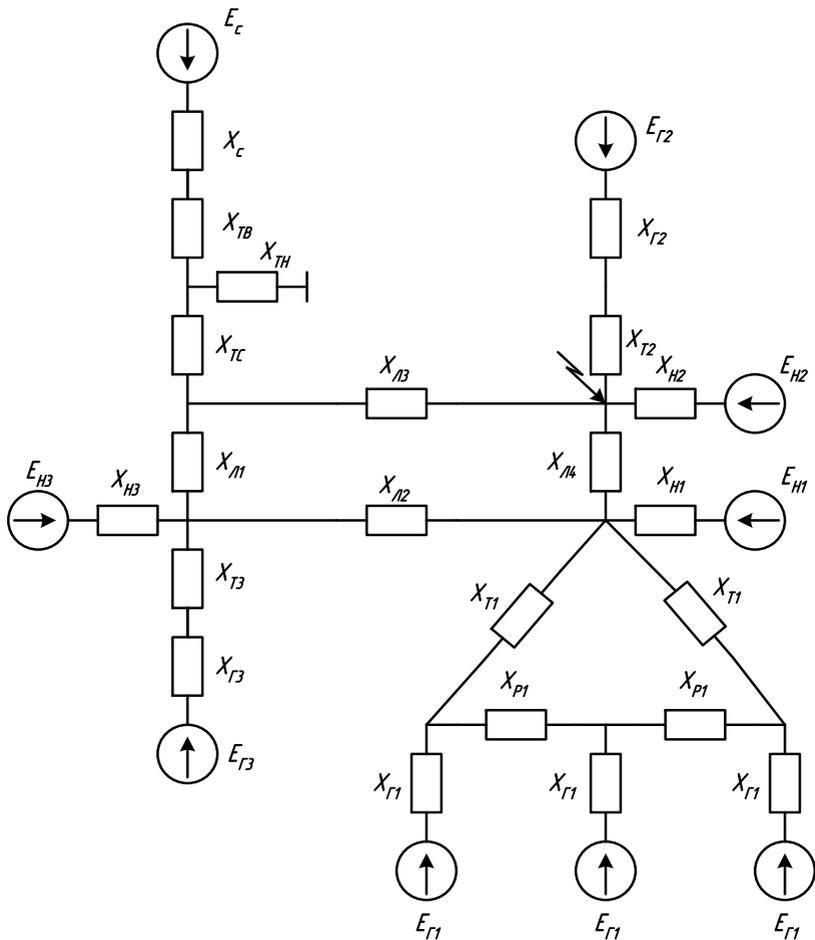


Рис. 4.2. Схема замещения

4.1.2. Находим параметры элементов для отдельных последовательностей.

Расчёт выполняем в о.е. Базисную мощность принимаем в связи с указанным рядом:

100; 1000; 10000. Принимаем базисную мощность равную $S_{\sigma} = 1000$ МВА. Определение параметров схемы замещения.

Генераторы:

$$E = \sqrt{(X_d \cdot \cos\varphi_n)^2 + (X_d \cdot \sin\varphi_n \pm 1)^2}$$

$$E_{*Г1} = \sqrt{(2.4 \cdot 0.85)^2 + (2.4 \cdot 0.527 + 1)^2} = 2.057$$

$$E_{*Г1}'' = \sqrt{(0.183 \cdot 0.85)^2 + (0.183 \cdot 0.527 + 1)^2} = 0.917$$

$$E_{*Г2}'' = \sqrt{(0.28 \cdot 0.85)^2 + (0.28 \cdot 0.527 + 1)^2} = 0.862$$

$$E_{*Г2} = \sqrt{(2.2 \cdot 0.85)^2 + (2.2 \cdot 0.527 + 1)^2} = 1.789$$

$$E_{*Г3}'' = \sqrt{(0.27 \cdot 0.8)^2 + (0.27 \cdot 0.6 + 1)^2} = 1.165$$

$$E_{*Г3} = \sqrt{(1.12 \cdot 0.8)^2 + (1.12 \cdot 0.6 + 1)^2} = 1.853$$

$$X_{*Г1} = X_{d1} \cdot \frac{S_{\sigma} \cdot \cos\varphi_1}{P_{H1}} = 2.4 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{100} = 20.4$$

$$X_{*Г1}'' = X_{d1}'' \cdot \frac{S_{\sigma} \cdot \cos\varphi_1}{P_{H1}} = 0.183 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{100} = 0.183$$

$$X_{*Г1} = X_2 \cdot \frac{S_{\sigma} \cdot \cos\varphi_1}{P_{H1}} = 0.223 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{100} = 1.896$$

$$X_{*Г2} = 2.2 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{500 \cdot 3} = 1.247$$

$$X_{*Г2}'' = 0.28 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{500 \cdot 3} = 0.159$$

$$X_{*Г2} = 0.25 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{500 \cdot 3} = 0.142$$

$$X_{*Г3} = 1.12 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{171 \cdot 8} = 0.696$$

$$X_{*Г3}'' = 0.27 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{171 \cdot 8} = 0.168$$

$$X_{*2Г3}'' = 0.28 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{171 \cdot 8} = 0.174$$

Система:

Для системы конечной мощности рекомендуется принимать:

$$X_{1C} = X_{2C}; E_{C*} = 1$$

$$X_{*C} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_C} = \frac{1000}{4500} = 0.222$$

Нагрузки:

Нагрузки в схему замещения для сверхпереходного режима входят как источники с параметрами $E_{H*}'' = 0.85$, $X_{H*}'' = 0.35$, а в установившемся режиме короткого замыкания — $E_{H*\infty} = 0$, $X_{H*\infty} = 1,2$. Для обратной последовательности $X_{2H*\infty} = 0,35$, для нулевой — $X_{0H*\infty} = 0,15$.

Приводим к базисным условиям:

$$X_{*H1} = X_{*H1}'' = 1.2 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H1}} = 1.2 \cdot \frac{1000}{1000} = 1.2$$

$$X_{*2H1} = X_{*2H1}'' = 0.35 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H1}} = 0.35 \cdot \frac{1000}{1000} = 0.35$$

$$X_{*0H1} = X_{*0H1}'' = 0.15 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H1}} = 0.15 \cdot \frac{1000}{1000} = 0.15$$

$$X_{*H2} = X_{*H2}'' = 1.2 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H2}} = 1.2 \cdot \frac{1000}{200} = 6$$

$$X_{*2H2} = X_{*2H2}'' = 0.35 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H2}} = 0.35 \cdot \frac{1000}{200} = 1.75$$

$$X_{*0H2} = 0.15 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H2}} = 0.15 \cdot \frac{1000}{200} = 0.75$$

$$X_{*H3} = X_{*H3}'' = 1.2 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H3}} = 1.2 \cdot \frac{1000}{880} = 1.364$$

$$X_{*2H3} = X_{*H3}'' = 0.35 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H3}} = 0.35 \cdot \frac{1000}{880} = 0.398$$

$$X_{*0H3} = 0.15 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{H3}} = 0.15 \cdot \frac{1000}{200} = 0.75$$

Воздушные линии:

$$X_{*Л1} = X_{*2Л1} = \frac{X_{y\partial}}{2} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = \frac{0.36}{2} \cdot 160 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0.544$$

$$X_{*Л2} = X_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = 0.36 \cdot 200 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1.361$$

$$X_{*Л3} = X_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = 0.36 \cdot 260 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1.769$$

$$X_{*Л4} = X_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = 0.36 \cdot 30 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0.204$$

Для одноцепной линии $X_{0Л} = 3X_{Л}$

Для двухцепной линии $X_{0Л} = 4,7X_{Л}$

$$X_{*0Л1} = 4.7 \cdot 0.544 = 2.557$$

$$X_{*0Л2} = 3 \cdot 1.361 = 4.083$$

$$X_{*0Л3} = 3 \cdot 1.769 = 5.307$$

$$X_{*0Л4} = 3 \cdot 0.204 = 0.612$$

Реакторы:

Сопrotивления прямой, обратной и нулевой последовательностей реакторов равно:

$$X_{*P} = X_P \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = 0.45 \cdot \frac{1000}{10.5^2} = 4.082$$

Автотрансформатор:

$$U_{кВ} = 0,5 \cdot (U_{кВ-С} + U_{кВ-Н} + U_{кС-Н}) = 0,5 \cdot (11 + 35 - 22) = 12 \%$$

$$U_{кС} = 0,5 \cdot (U_{кВ-С} + U_{кС-Н} + U_{кВ-Н}) = 0,5 \cdot (11 + 22 - 35) = -1 \%$$

$$U_{\kappa B} = 0,5 \cdot (U_{\kappa B-H} + U_{\kappa C-H} - U_{\kappa B-C}) = 0,5 \cdot (35 + 22 - 11) = 23 \%$$

$$X_{TB} = \frac{U_{\kappa B}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H} = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 500} = 0.24$$

$$X_{TC} = \frac{U_{\kappa C}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H} = \frac{-1 \cdot 1000}{100 \cdot 500} = -0.02$$

$$X_{TH} = \frac{U_{\kappa H}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H} = \frac{23 \cdot 1000}{100 \cdot 500} = 0.46$$

Трансформаторы:

$$X_{*T} = X''_{*T} = \frac{U_{\kappa} \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H \cdot n}$$

$$X_{*T1} = X_{*2T1} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{125} = 0.88$$

$$X_{*T2} = X_{*2T2} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{1000}{630 \cdot 3} = 0.056$$

$$X_{*T3} = X_{*2T3} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{200 \cdot 8} = 0.069$$

$$X_{*0T1} = 0.85 \cdot 0.88 = 0.75$$

$$X_{*0T2} = 0.85 \cdot 0.056 = 0.048$$

$$X_{*0T3} = 0.85 \cdot 0.069 = 0.059$$

4.1.3. Преобразование схемы прямой последовательности.

Преобразуем отдельно X_{T1} , X_P , X_{T1} .

$$X_1 = 2X_P + \frac{X_P^2}{X_{T1}} = 2 \cdot 4.082 + \frac{4.082^2}{20.4} = 8.98;$$

$$X_2 = X_3 = X_P + X_{T1} + \frac{X_P \cdot X_{T1}}{X_P} = 4.082 + 2 \cdot 20.4 = 44.882;$$

$$X_1'' = 2X_P + \frac{X_P^2}{X_{T1}''} = 2 \cdot 4.082 + \frac{4.082^2}{0.183} = 18.873;$$

$$X_2'' = X_3'' = X_P + 2X_{T1}'' = 4.082 + 2 \cdot 0.183 = 7.193$$

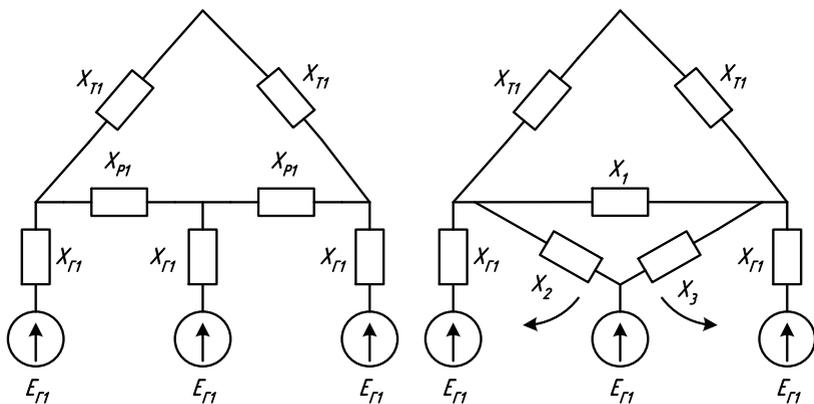


Рис. 4.3. Преобразование схемы замещения

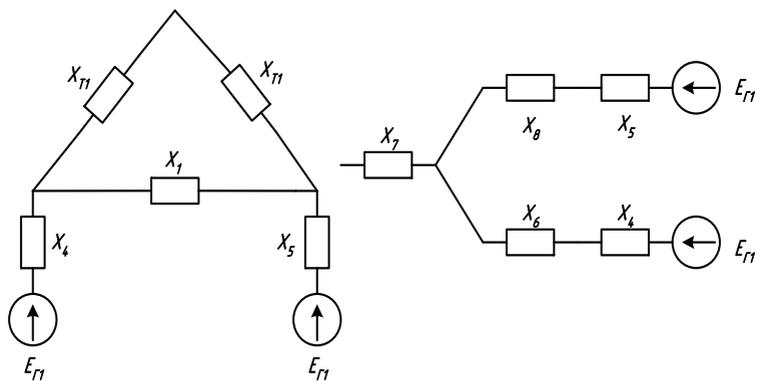


Рис. 4.4. Преобразование схемы замещения

$$X_4 = \frac{X_2 \cdot X_{Г1}}{X_2 + X_{Г1}} = 14.025 ;$$

$$X_4'' = \frac{X_2'' \cdot X_{Г1}}{X_2'' + X_{Г1}} = 1.279 ;$$

$$X_7 = \frac{X_{T1}^2}{2X_{T1} + X_P} = 0.072;$$

$$X_7'' = \frac{X_{T1}^2}{2X_{T1} + X_P''} = 0.038;$$

$$X_6 = X_8 = \frac{X_{T1} \cdot X_1}{2X_{T1} + X_1} = 0.736;$$

$$X_6'' = X_8'' = \frac{X_{T1}'' \cdot X_1''}{2X_{T1}'' + X_1''} = 0.805.$$

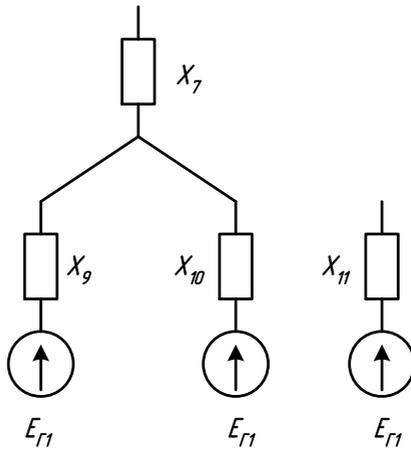


Рис.4.5. Преобразование схемы замещения

$$X_9 = X_6 + X_4 = 14.761, \quad X_9'' = X_4'' + X_6'' = 2.084,$$

$$X_{11} = \frac{X_{10}^2}{2X_{10}} + X_7 = 7.453, \quad X_{11}'' = \frac{X_{10}''^2}{2X_{10}''} + X_7'' = 1.079$$

$$X_{12} = X_{T3} + X_{3\Gamma} = 0.765, \quad X_{12}'' = X_{T3}'' + X_{3\Gamma}'' = 0.237,$$

$$X_{15} = \frac{X_{\Gamma2} + X_{\Gamma2}}{2} = 1.032, \quad X_{15}'' = \frac{X_{\Gamma2}'' + X_{\Gamma2}''}{2} = 0.214,$$

$$X_{17} = X_C + X_{BT} = 0.462, \quad X_{18} = X_{17} + X_{TC} = 0.442.$$

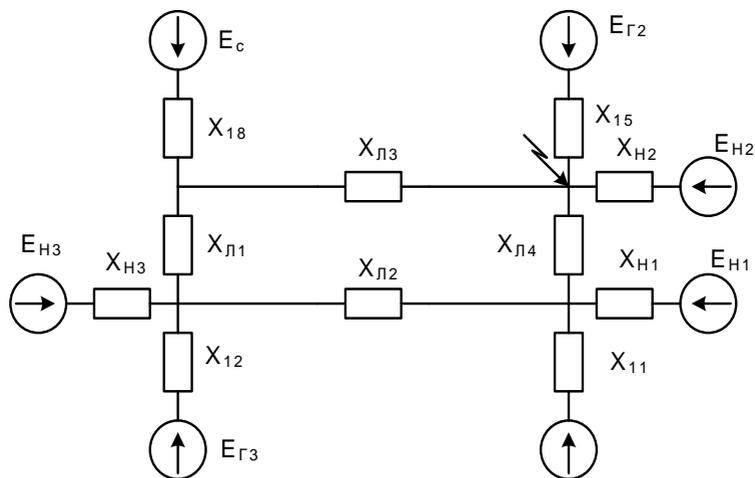


Рис. 4.6. Преобразование схемы замещения

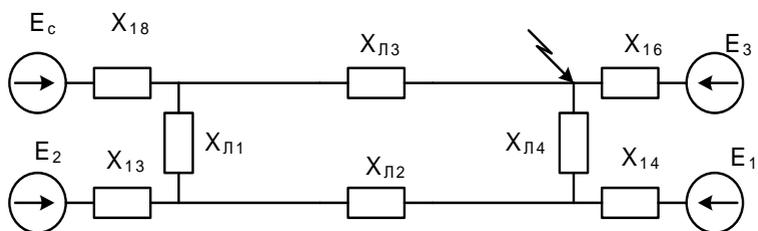


Рис. 4.7. Преобразование схемы замещения

$$E_1 = \frac{E_{Г1} \cdot X_{H1} + E_{H1} \cdot X_{11}}{X_{11} + X_{H1}} = 0.06,$$

$$E_1'' = \frac{E_{Г1}'' \cdot X_{H1}'' + E_{H1}'' \cdot X_{11}''}{X_{11}'' + X_{H1}''} = 0.913,$$

$$X_{14} = \frac{X_{11} \cdot X_{H1}}{X_{11} + X_{H1}} = 0.147,$$

$$X_{14}'' = \frac{X_{11}'' \cdot X_{H1}''}{X_{11}'' + X_{H1}''} = 0.269,$$

$$E_3 = \frac{E_{\Gamma 2} \cdot X_{H2} + E_{H2} \cdot X_{15}}{X_{15} + X_{H2}} = 0.301,$$

$$E_3'' = \frac{E_{\Gamma 2}'' \cdot X_{H2}'' + E_{H2}'' \cdot X_{15}''}{X_{15}'' + X_{H2}''} = 1.06,$$

$$X_{16} = \frac{X_{15} \cdot X_{H2}}{X_{15} + X_{H2}} = 0.135,$$

$$X_{16}'' = \frac{X_{15}'' \cdot X_{H2}''}{X_{15}'' + X_{H2}''} = 0.133,$$

$$E_2 = \frac{E_{\Gamma 3} \cdot X_{H3} + E_{H3} \cdot X_{12}}{X_{12} + X_{H3}} = 0.304,$$

$$E_2'' = \frac{E_{\Gamma 3}'' \cdot X_{H3}'' + E_{H3}'' \cdot X_{12}''}{X_{12}'' + X_{H3}''} = 1.038,$$

$$X_{13}'' = \frac{X_{12}'' \cdot X_{H3}''}{X_{12}'' + X_{H3}''} = 0.141,$$

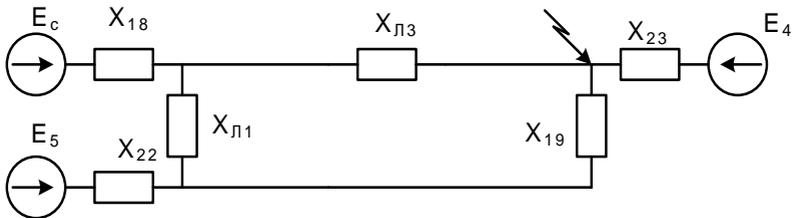


Рис. 4.8. Преобразование схемы замещения

При этом:

$$X_{19} = X_{Л1} + X_{Л4} + \frac{X_{Л1} \cdot X_{Л4}}{X_{Л4}} = 3.455,$$

$$X_{19}'' = X_{J11} + X_{J14} + \frac{X_{J11} \cdot X_{J14}}{X_{14}} = 2.617,$$

$$X_{20} = X_{J14} + X_{14} + \frac{X_{J14} \cdot X_{14}}{X_{J12}} = 0.373,$$

$$X_{20}'' = X_{J14} + X_{14} + \frac{X_{J14} \cdot X_{14}}{X_{J12}} = 0.508,$$

$$X_{21} = X_{J12} + X_{14} + \frac{X_{J12} \cdot X_{14}}{X_{J14}} = 2.488,$$

$$X_{21}'' = X_{J12} + X_{14} + \frac{X_{J12} \cdot X_{14}}{X_{J14}} = 3.387,$$

$$E_5 = \frac{E_1 \cdot X_{13} + E_2 \cdot X_{21}}{X_{13} + X_{21}} = 0.292,$$

$$E_5'' = \frac{E_1'' \cdot X_{13} + E_2'' \cdot X_{21}''}{X_{21} + X_{13}} = 1.033,$$

$$X_{22} = \frac{X_{21} \cdot X_{13}}{X_{21} + X_{13}} = 0.119,$$

$$X_{22}'' = \frac{X_{21}'' \cdot X_{13}''}{X_{21} + X_{13}''} = 0.135,$$

$$E_4 = \frac{E_1 \cdot X_{16} + E_3 \cdot X_{20}}{X_{16} + X_{20}} = 0.288,$$

$$E_4'' = \frac{E_1 \cdot X_{16} + E_3 \cdot X_{21}}{X_{16} + X_{21}} = 1.055,$$

$$X_{23} = \frac{X_{16} \cdot X_{20}}{X_{16} + X_{20}} = 0.128,$$

$$X_{23}'' = \frac{X_{16}'' \cdot X_{20}''}{X_{16}'' + X_{20}''} = 0.128.$$

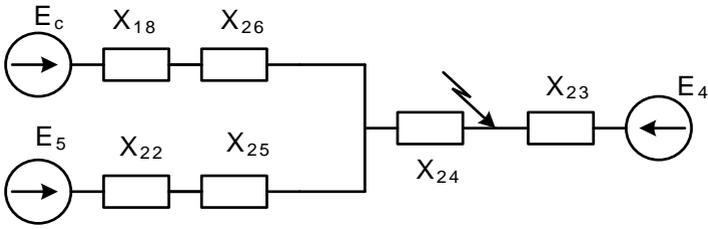


Рис. 4.9. Преобразование схемы замещения

$$X_{24} = \frac{X_{J3} \cdot X_{19}}{X_{J3} + X_{19} + X_{J1}} = 1.06, \quad X_{24}'' = \frac{X_{J3} \cdot X_{19}''}{\sum X''} = 0.939,$$

$$X_{25} = \frac{X_{J1} \cdot X_{19}}{\sum X} = 0.326, \quad X_{25}'' = \frac{X_{J1} \cdot X_{19}''}{\sum X''} = 0.289,$$

$$X_{26} = \frac{X_{J1} \cdot X_{J3}}{\sum X} = 0.167, \quad X_{26}'' = \frac{X_{J1} \cdot X_{J3}''}{\sum X''} = 0.195.$$

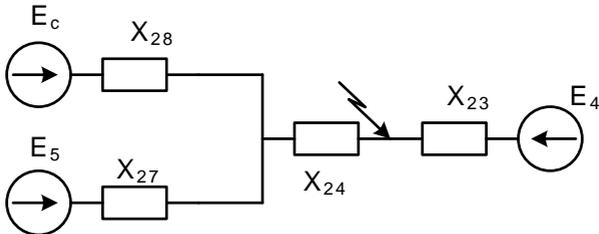


Рис. 4.10. Преобразование схемы замещения

$$X_{27} = X_{22} + X_{25} = 0.445, \quad X_{27}'' = X_{22}'' + X_{25}'' = 0.424,$$

$$X_{28} = X_{18} + X_{26} = 0.629, \quad X_{28}'' = X_{18}'' + X_{26}'' = 0.658,$$

$$X_{29} = \frac{X_{27} \cdot X_{28}}{X_{27} + X_{28}} + X_{24} = 0.261, \quad X_{29}'' = \frac{X_{27}'' \cdot X_{28}''}{X_{27}'' + X_{28}''} + X_{24}'' = 1.197.$$

4.1.4. Преобразование схемы замещения обратной последовательности производится аналогично схеме прямой последовательности, без учета ЭДС.

Получаем: $X_{30} = 0.146$.

4.1.5. Составление схемы замещения нулевой последовательности производится от точки короткого замыкания с учетом заземления обмоток нейтралей трансформаторов и автотрансформаторов.

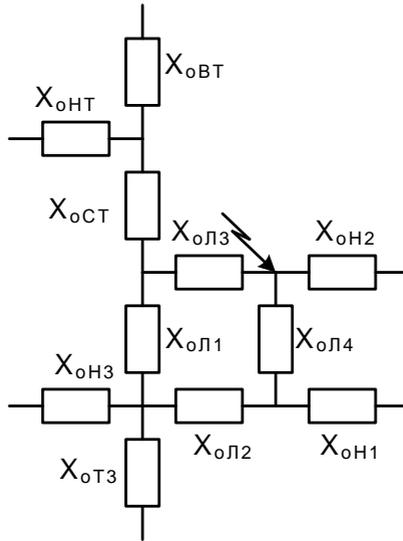


Рис.4.11 Схема замещения нулевой последовательности

$$X_1 = \frac{X_{o3H} X_{oT3}}{X_{o3H} + X_{oT3}} = 0.055,$$

$$X_2 = X_{oЛ4} + X_{oЛ2} + \frac{X_{oЛ4} X_{oЛ2}}{X_{oH1}} = 21.354,$$

$$X_3 = X_{oH1} + X_{oЛ2} + \frac{X_{oH1} X_{oЛ2}}{X_{oЛ4}} = 5.234,$$

$$X_4 = X_{oЛ4} + X_{oH1} + \frac{X_{oЛ4} X_{oH1}}{X_{oЛ2}} = 5.234,$$

$$X_5 = \frac{X_1 X_3}{X_1 + X_3} = 0.054,$$

$$X_6 = \frac{X_4 X_{o2H}}{X_4 + X_{o2H}} = 0.383,$$

$$X_7 = \frac{X_{oЛ3} X_{oЛ1}}{X_{oЛ1} + X_2 + X_{oЛ3}} = 0.464,$$

$$X_8 = \frac{X_{oЛ1} X_2}{X_{oЛ1} + X_2 + X_{oЛ3}} = 1.869,$$

$$X_9 = \frac{X_{oЛ3} X_2}{X_{oЛ1} + X_2 + X_{oЛ3}} = 3.879,$$

$$X_{10} = X_8 + X_5 = 1.923,$$

$$X_{11} = X_{TB} + X_7 = 0.668,$$

$$X_{12} = \frac{X_{11} \cdot X_{10}}{X_{11} + X_{10}} + X_9 = 4.375,$$

$$X_{13} = \frac{X_{12} X_6}{X_{12} + X_6} = 0.349.$$

Аналогично преобразуем схему к виду:

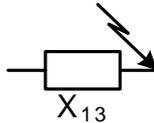


Рис. 4.12. Преобразованная схема

Суммарное индуктивное сопротивление нулевой последовательности равно:

$$X_{I3} = 0.349.$$

4.1.6. Сворачивание схемы активных сопротивлений сверхпереходного режима ведётся как в прямой и обратной последовательностях, без учёта нагрузок, E , и системы.

Суммарное активное сопротивление равно:

$$R_{26} = 0.002$$

4.2. Расчёт трёхфазного короткого замыкания.

4.2.1. Расчёт периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания.

Для установившегося значения тока:

$$I = \frac{E}{X} \cdot I_B = 7.017 \text{ кА.}$$

Для сверхпереходного тока:

$$I'' = \frac{E''}{X''} \cdot I_B = 22.833 \text{ кА.}$$

4.2.2. Ударный ток в месте короткого замыкания.

$$i_y = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I'' = 64.575 \text{ кА}$$

$$T_{* \text{ э}} = \frac{X_{\text{рез}}}{R_{2\text{с}}} = 50.773$$

$$t_{\sigma} = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{314} = 3.18 \cdot 10^{-3}$$

$$T_{\text{э}} = T_{* \text{ э}} \cdot t_{\sigma} = 0.161$$

$$K_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_{\text{э}}}} = 2$$

4.2.3. Мощность короткого замыкания. в месте повреждения

$$S_K = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НК}} \cdot I'' = 9096 \text{ МВА}$$

4.2.4. Действующее значение полного тока короткого замыкания за первый период его изменения

$$I_y = I'' \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 39.543 \text{ кА}$$

4.3. Расчёт несимметричного короткого замыкания

4.3.1. Для однофазного короткого замыкания.

$$\Delta X^{(1)} = X_{30} + X_{13} = 0.501$$

Начальное значение тока прямой последовательности:

$$I_{n1}''^{(1)} = \frac{E_{\Sigma}'' \cdot I_{\sigma}}{X_{1\Sigma}'' + \Delta X^{(1)}} = 3.714 \text{ кА}$$

для однофазного короткого замыкания: $m^{(1)} = 3$

Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$I_{n1}^{(1)} = I_{n2}^{(1)} = I_{n0}^{(1)} = I_m \cdot I_{\sigma} = 3.714 \text{ кА}$$

Напряжения отдельных последовательностей в месте короткого замыкания определяем в соответствии с уравнениями II закона Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} U_{K1}^{(1)} &= j\Delta X^{(1)} \cdot I_{n1}^{(1)} \\ U_{K2}^{(1)} &= 0 - jX_{2\Sigma} \cdot I_{n2}^{(1)} \\ U_{K0}^{(1)} &= 0 - jX_{0\Sigma} \cdot I_{n0}^{(1)} \end{aligned} \right\}$$

Расчёт ведём в именованных единицах

$$\Delta X^{(1)} = \Delta X \cdot \frac{U_{HK}^2}{S_{\bar{\sigma}}} = 26.503 \text{ Ом}$$

$$X_{2\Sigma} = X_{30} \cdot \frac{U_{HK}^2}{S_{\bar{\sigma}}} = 7.829 \text{ Ом}$$

$$X_{0\Sigma} = X_{13} \cdot \frac{U_{HK}^2}{S_{\bar{\sigma}}} = 18.674 \text{ Ом}$$

$$U_{K1}^{(1)} = j3.714 \cdot 26.503 = j98.425, \text{ кВ}$$

$$U_{K2}^{(1)} = -j3.714 \cdot 7.829 = -j29.076, \text{ кВ}$$

$$U_{K0}^{(1)} = -j3.714 \cdot 18.674 = -j69.349, \text{ кВ}$$

4.3.2. Определение фазных величин и построение векторных диаграмм:

Для напряжений:

$$\left. \begin{aligned} U_{KB}^{(1)} &= a^2 \cdot U_{K1}^{(1)} + a \cdot U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} \\ U_{KC}^{(1)} &= a \cdot U_{K1}^{(1)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} \end{aligned} \right\}$$

$$a = e^{j120} = \text{Cos}120 + j\text{Sin}120 = -0.5 + j0.87$$

$$a^2 = e^{j240} = \text{Cos}240 + j\text{Sin}240 = -0.5 - j0.87$$

$$a^2 \cdot U_{K1}^{(1)} = 85.63 - j49.212, \text{ кВ};$$

$$a \cdot U_{K2}^{(1)} = 25.296 + j14.538, \text{ кВ};$$

$$U_{KB}^{(1)} = 110.926 - j104.023, \text{ кВ};$$

$$a \cdot U_{K1}^{(1)} = -85.63 - j49.212 \text{ кВ};$$

$$a^2 \cdot U_{K2}^{(1)} = -25.296 + j14.538, \text{ кВ};$$

$$U_{KC}^{(1)} = -110.926 - j104.023, \text{ кВ};$$

$$U_{KA}^{(1)} = U_{k1}^{(1)} + U_{k2}^{(1)} + U_{k0}^{(1)} = 0, \text{ кВ.}$$

Для токов:

$$I_A^{(1)} = I_{K1}^{(1)} + I_{K2}^{(1)} + I_{K0}^{(1)} = 3I_{KA}^{(1)}a, \text{ кА;}$$

$$\left. \begin{aligned} I_{KB}^{(1)} &= a^2 \cdot I_{K1}^{(1)} + a \cdot I_{K2}^{(1)} + I_{K0}^{(1)} \\ I_{KC}^{(1)} &= a \cdot I_{K1}^{(1)} + a^2 \cdot I_{K2}^{(1)} + I_{K0}^{(1)} \end{aligned} \right\};$$

$$a^2 \cdot I_{K1}^{(1)} = -1.857 - j3.231, \text{ кА;}$$

$$a \cdot I_{K2}^{(1)} = -1.857 + j3.231, \text{ кА;}$$

$$I_{KB}^{(1)} = 0, \text{ кА;}$$

$$a \cdot I_{K1}^{(1)} = -1.857 + j3.231, \text{ кА;}$$

$$a^2 \cdot I_{K2}^{(1)} = -1.857 - j3.231, \text{ кА;}$$

$$I_{KC}^{(1)} = 0, \text{ кА.}$$

Построение векторных диаграмм токов и напряжений в точке короткого замыкания.

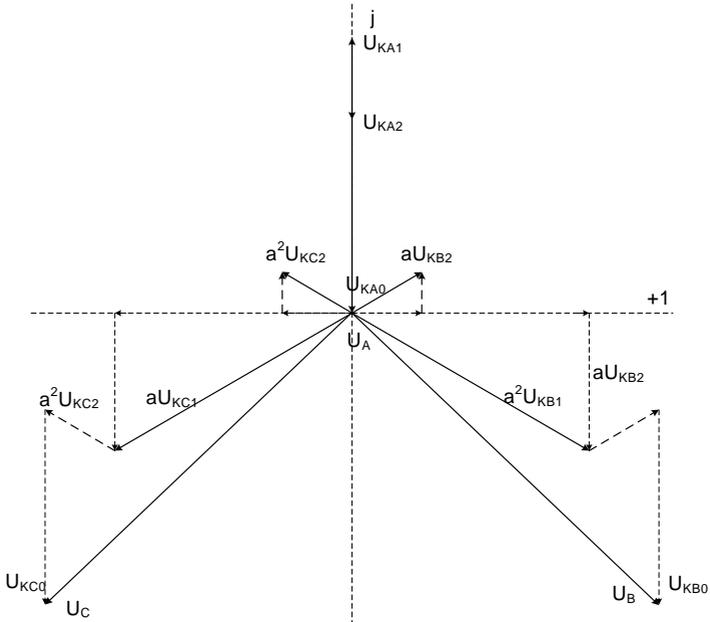


Рис. 4.13. Векторная диаграмма напряжений в точке к.з.

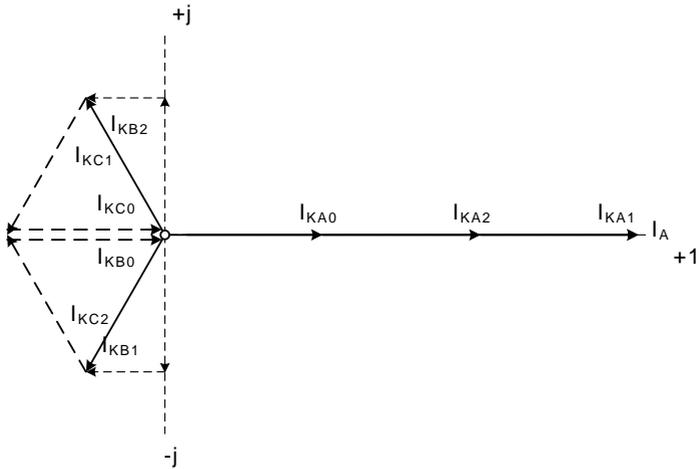


Рис. 4.14. Векторная диаграмма токов в точке к.з.

4.3.3. Для двухфазного короткого замыкания:

$$\Delta X^{(2)} = X_{30} = 0,148.$$

Начальное значение тока прямой последовательности:

$$I_{n1}^{(2)} = \frac{E_{\Sigma}'' \cdot I_{\phi}}{X_{I\Sigma}'' + \Delta X^{(1)}} = 8,71, \text{ кА}$$

для двухфазного короткого замыкания: $m = \sqrt{3}$.

Ток обратной последовательности:

$$I_{ka2}^{(2)} = -I_{ka1}^{(2)} = -8,71 \text{ кА.}$$

Напряжения отдельных последовательностей в месте короткого замыкания определяем в соответствии с уравнениями II закона Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} U_{K1}^{(2)} &= j\Delta X^{(1)} \cdot I_{n1}^{(2)} \\ U_{K2}^{(2)} &= 0 - jX_{2\Sigma} \cdot I_{n2}^{(2)} \\ U_{K0}^{(2)} &= 0 - jX_{0\Sigma} \cdot I_{n0}^{(2)} \end{aligned} \right\}$$

$$U_{K1}^{(2)} = j68,191, \text{ кВ};$$

$$U_{K2}^{(2)} = j68,191, \text{ кВ.}$$

4.3.4. Определение фазных величин и построение векторных диаграмм.

Для токов.

Ток в фазе А:

$$I_A = I_{ka1} + I_{ka2} = 0, \text{ кА}$$

Ток в фазе В:

$$I_B = a^2 I_{ka1} + a I_{ka2} = -j15,156, \text{ кА}$$

Ток в фазе С:

$$I_C = a I_{ka1} + a^2 I_{ka2} = j15,156, \text{ кА}$$

$$a^2 I_{ka1} = -4,355 - j7,578, \text{ кА};$$

$$a I_{ka2} = 4,355 - j7,578, \text{ кА};$$

$$a I_{ka1} = -4,355 + j7,578, \text{ кА};$$

$$a^2 I_{ka2} = 4,355 + j7,578, \text{ кА.}$$

Для напряжений.

Напряжение в фазе А:

$$U_A^{(2)} = U_{K1}^{(2)} + U_{K2}^{(2)} = j136.382, \text{ кВ}$$

Напряжение в фазе В:

$$U_B^{(2)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(2)} + a \cdot U_{K2}^{(2)} = -j68.191, \text{ кВ}$$

Напряжение в фазе С:

$$U_C^{(2)} = a \cdot U_{K1}^{(2)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(2)} = -j68.191, \text{ кВ}$$

$$a^2 \cdot U_{K1}^{(2)} = 59.326 - j34.096, \text{ кВ};$$

$$a \cdot U_{K2}^{(2)} = -59.326 - j34.096, \text{ кВ}$$

$$a \cdot U_{K1}^{(2)} = -59.326 - j34.096, \text{ кВ};$$

$$a^2 \cdot U_{K2}^{(2)} = 59.326 - j34.096, \text{ кВ}$$

Построение векторных диаграмм токов и напряжений в точке короткого замыкания.

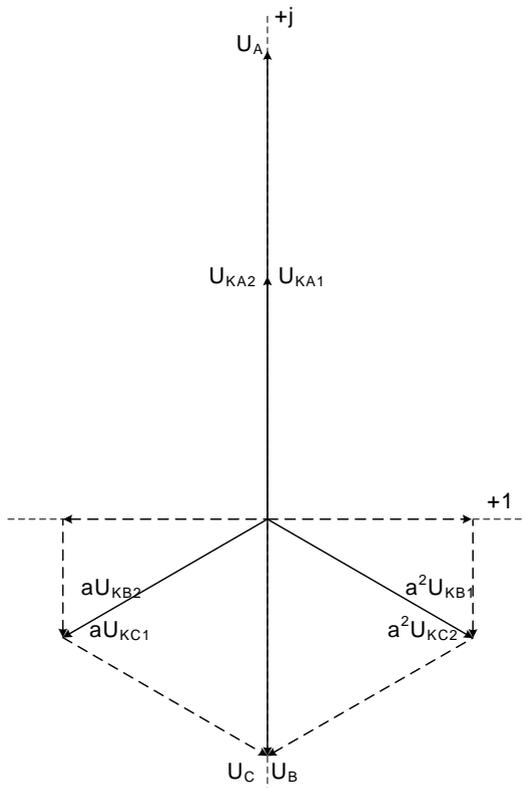


Рис. 4.15. Векторная диаграмма напряжений в точке короткого замыкания

4.3.5. Для двухфазного короткого замыкания на землю:

$$\Delta X^{(1.1)} = \frac{X_{30} \cdot X_{13}}{X_{30} + X_{13}} = \frac{18.674 \cdot 7.829}{7.829 + 18.674} = 5,502; \text{ Ом}.$$

Начальное значение тока прямой последовательности:

$$I_{n1}^{(1.1)} = \frac{E_{\Sigma}'' \cdot I_{\sigma}}{X_{I\Sigma}'' + \Delta X^{(1.1)}} = 10,447; \text{ кА}$$

Для двухфазного короткого замыкания на землю:

$$m = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{30} \cdot X_{13}}{X_{30} + X_{13}}}$$

Токи обратной и нулевой последовательностей:

$$I_{kA2}^{(1.1)} = -I_{kA1}^{(1.1)} \cdot \frac{X_{13}}{X_{13} + X_{30}} = -7,361; \text{ кА}$$

$$I_{kA0}^{(1.1)} = -I_{kA1}^{(1.1)} \cdot \frac{X_{30}}{X_{13} + X_{30}} = -3,086; \text{ кА}$$

Напряжения отдельных последовательностей в месте короткого замыкания определяем в соответствии с уравнениями II закона Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} U_{K1}^{(1.1)} &= j\Delta X^{(1.1)} \cdot I_{n1}^{(1.1)} \\ U_{K2}^{(1.1)} &= 0 - jX_{2\Sigma} \cdot I_{n2}^{(1.1)} \\ U_{K0}^{(1.1)} &= 0 - jX_{0\Sigma} \cdot I_{n0}^{(1.1)} \end{aligned} \right\}$$

$$U_{K1}^{(1.1)} = j57,478; \text{ кВ}$$

$$U_{K2}^{(1.1)} = j57,478; \text{ кВ}$$

$$U_{K0}^{(1.1)} = j57,478; \text{ кВ}$$

4.3.6. Определение фазных величин и построение векторных диаграмм

Для токов.

Ток в фазе А:

$$I_A = I_{kA1} + I_{kA2} = 0, \text{ кА}$$

Ток в фазе В:

$$I_B = a^2 I_{kA1} + a I_{kA2} + I_{kA0} = -4,629 - j15,493; \text{ кА}$$

Ток в фазе С:

$$I_C = a I_{kA1} + a^2 I_{kA2} + I_{kA0} = -4,629 + j15,493; \text{кА}$$

$$a^2 I_{kA1} = -5,223 - j9,089; \text{кА};$$

$$a I_{kA2} = 3,68 - j6,404; \text{кА}$$

$$a I_{kA1} = 3,68 + j6,404; \text{кА};$$

$$a^2 I_{kA2} = -5,223 + j9,089; \text{кА}.$$

Для напряжений.

Напряжение в фазе А:

$$U_A^{(1,1)} = U_{K1}^{(1,1)} + U_{K2}^{(1,1)} + U_{K0}^{(1,1)} = j172,434; \text{кВ}$$

Напряжение в фазе В:

$$U_B^{(1,1)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(1,1)} + a \cdot U_{K2}^{(1,1)} + U_{K0}^{(1,1)} = 0; \text{кВ}$$

Напряжение в фазе С:

$$U_C^{(1,1)} = a \cdot U_{K1}^{(1,1)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(1,1)} + U_{K0}^{(1,1)} = 0; \text{кВ}$$

$$a^2 \cdot U_{K1}^{(1,1)} = 50,006 - j28,739; \text{кВ};$$

$$a \cdot U_{K2}^{(1,1)} = -50,006 - j28,739; \text{кВ}$$

$$a \cdot U_{K1}^{(1,1)} = -50,006 - j28,739; \text{кВ};$$

$$a^2 \cdot U_{K2}^{(1,1)} = 50,006 - j28,739; \text{кВ}$$

Построение векторных диаграмм токов и напряжений в точке короткого замыкания.

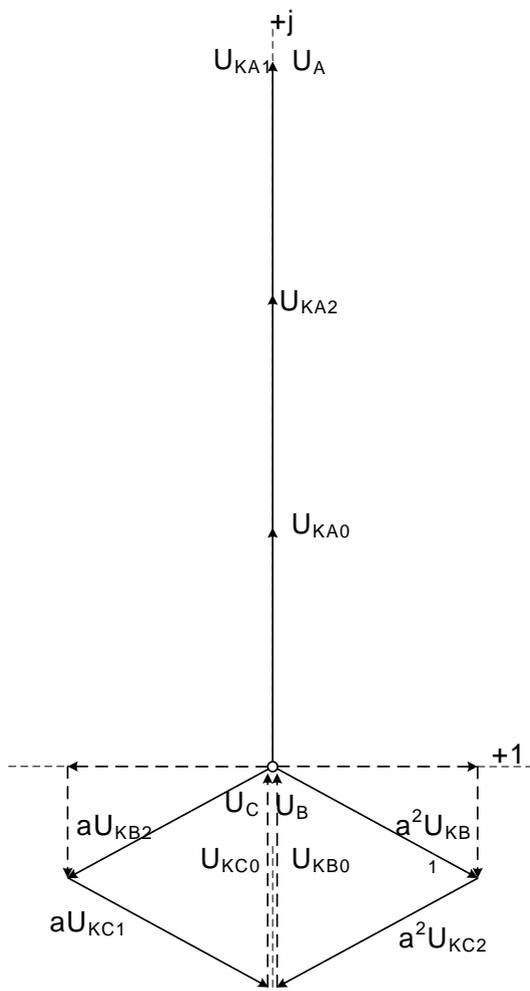


Рис. 4.17. Векторная диаграмма напряжений в точке короткого замыкания

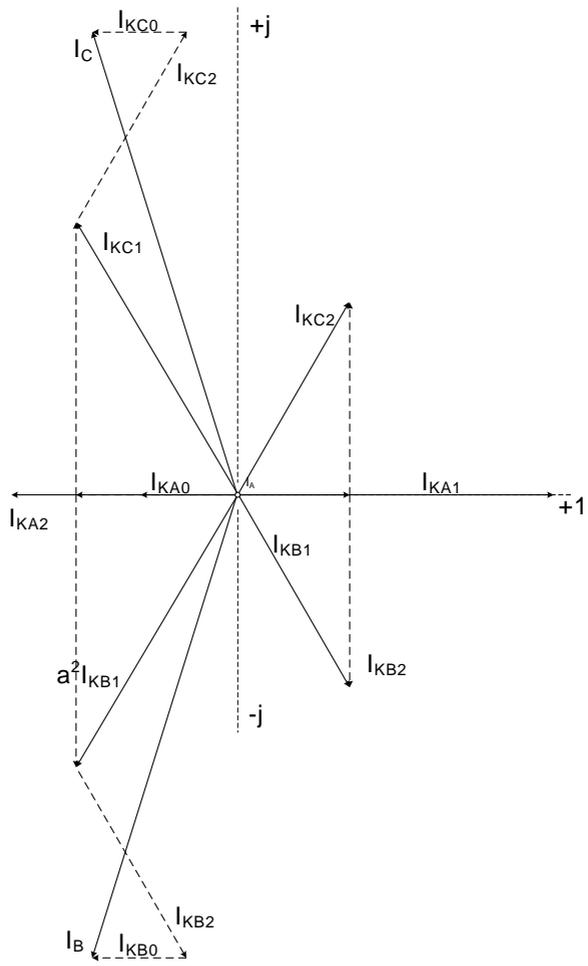


Рис. 4.18. Векторная диаграмма токов в точке короткого замыкания

4.4. Определение напряжения в удаленной точке на средней стороне автотрансформатора при однофазном коротком замыкании.

Падение напряжения от точки короткого замыкания до шин автотрансформатора для схемы прямой последовательности:

Прямая последовательность

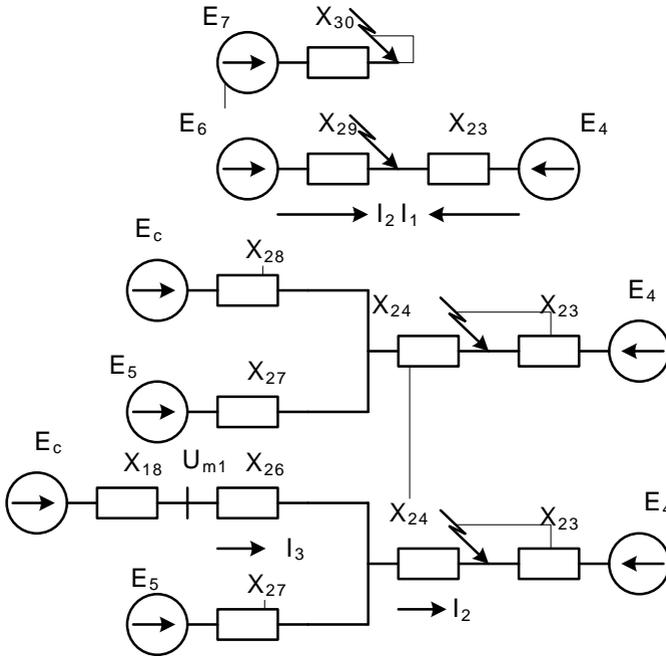


Рис. 4.19. Схема замещения прямой последовательности

$$X_{29} = 1.197 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.321 \text{ Ом}$$

$$X_{28} = 0.658 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.808 \text{ Ом}$$

$$I_2 = \frac{E_6 - U_{K1}^{(1)}}{X_{29}} = \frac{224.4 - 98.425}{63.321} = 1.986 \text{ кА}$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 1.986 \cdot \frac{34.808}{34.808 + 22.43} = 1.208 \text{ кА};$$

$$X_{24} = 0.939 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.673, \text{ Ом};$$

$$X_{27} = 0.424 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.43, \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.316, \text{ Ом};$$

$$U_{m1}^{(1)} = U_{K1}^{(1)} + I_2 \cdot X_{24} + I_3 \cdot X_{26} = 98.425 + 1.986 \cdot 49.673 + 1.208 \cdot 10.316 = 209.54 \text{ кВ}.$$

Расчёт обратной последовательности.

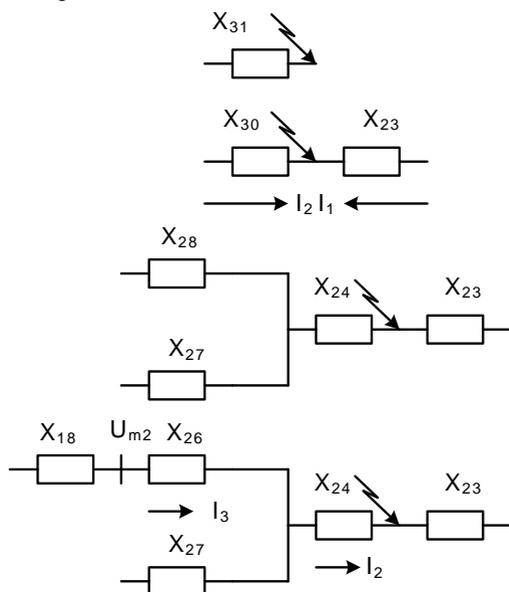


Рис. 4.20. Схема замещения обратной последовательности

$$X_{29} = 1.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.235, \text{ Ом};$$

$$X_{28} = 0.659 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.843, \text{ Ом};$$

$$I_2 = \frac{U_{K2}^{(1)}}{X_{29}} = \frac{29.076}{63.235} = 0.46, \text{ кА};$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 0.46 \cdot \frac{34.843}{34.843 + 22.85} = 0.276, \text{ кА};$$

$$X_{24} = 0.935 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.435, \text{ Ом};$$

$$X_{27} = 0.432 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.85, \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.196 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.392, \text{ Ом};$$

$$U_{m2}^{(1)} = U_{K2}^{(1)} - I_2 \cdot X_{24} - I_3 \cdot X_{26} = -29.076 - 0.46 \cdot 49.435 - 0.276 \cdot 10.392 = -54.684 \text{ кВ}.$$

$$X_{12} = 4.375 \cdot \frac{230^2}{1000} = 231.44, \text{ Ом};$$

$$X_{11} = 0.668 \cdot \frac{230^2}{1000} = 35.337, \text{ Ом};$$

$$X_{10} = 1.923 \cdot \frac{230^2}{1000} = 101.73, \text{ Ом};$$

$$X_9 = 3.879 \cdot \frac{230^2}{1000} = 205.19, \text{ Ом};$$

$$X_7 = 0.464 \cdot \frac{230^2}{1000} = 24.546, \text{ Ом};$$

$$I_2 = \frac{U_{K0}^{(1)}}{X_{12}} = \frac{69.349}{231.44} = 0.3, \text{ кА};$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{11}}{X_{10} + X_{11}} = 0.3 \cdot \frac{35.337}{35.337 + 101.73} = 0.077, \text{ кА};$$

$$U_{m0}^{(1)} = U_{K0}^{(1)} - I_2 \cdot X_9 - I_3 \cdot X_{11} = -69.349 - 0.3 \cdot 205.19 - 0.077 \cdot 24.546 = -132.796 \text{ кВ}.$$

Расчёт нулевой последовательности.

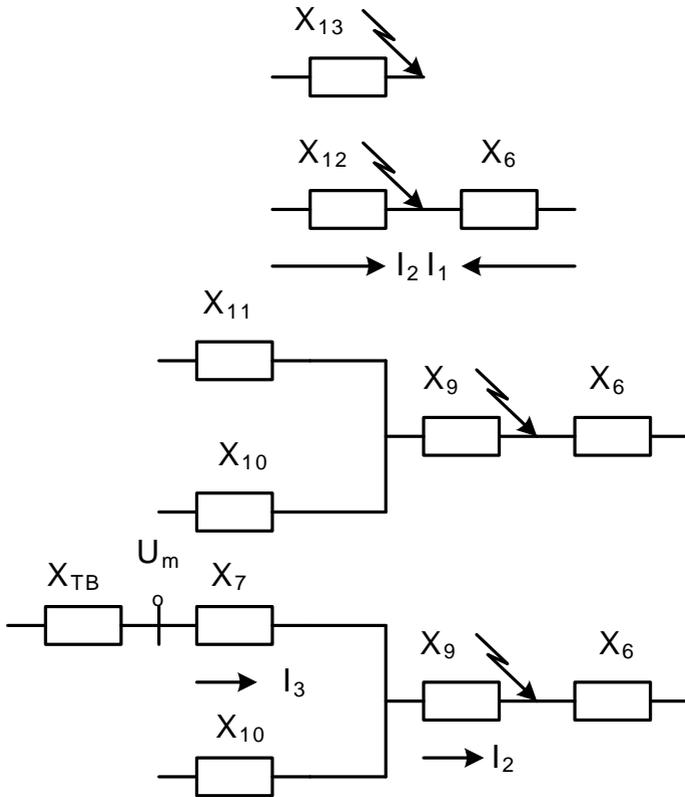


Рис. 4.21. Схема замещения нулевой последовательности

Определение фазных величин и построение векторной диаграммы на средней стороне автотрансформатора.

Для напряжений.

Напряжение в фазе А:

$$U_A^{(1)} = U_{K1}^{(1)} + U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = j209.54 - j54.684 - j132.796 = j22.06; \text{кВ}$$

Напряжение в фазе В:

$$U_B^{(1)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(1)} + a \cdot U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = 0; \text{кВ}$$

Напряжение в фазе С:

$$U_C^{(1)} = a \cdot U_{K1}^{(1)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = 0; \text{кВ}$$

$$a^2 \cdot U_{K1}^{(1)} = 182.3 - j104.77; \text{кВ};$$

$$a \cdot U_{K2}^{(1)} = 47.575 + j27.342; \text{кВ}$$

$$a \cdot U_{K1}^{(1)} = -182.3 - j104.77; \text{кВ};$$

$$a^2 \cdot U_{K2}^{(1)} = -47.575 + j27.342; \text{кВ}$$

Построение векторных диаграмм токов и напряжений в точке короткого замыкания.

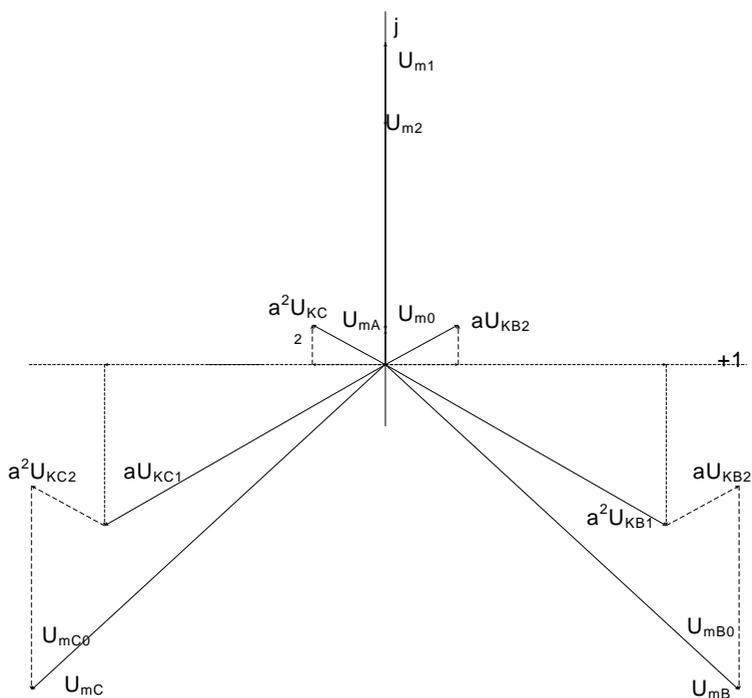


Рис. 4.22. Векторная диаграмма напряжений в точке короткого замыкания

4.5. Определение напряжения в удаленной точке на средней стороне автотрансформатора при двухфазном коротком замыкании.

Падение напряжения от точки короткого замыкания до шин автотрансформатора для схемы прямой последовательности:

Для прямой последовательности.

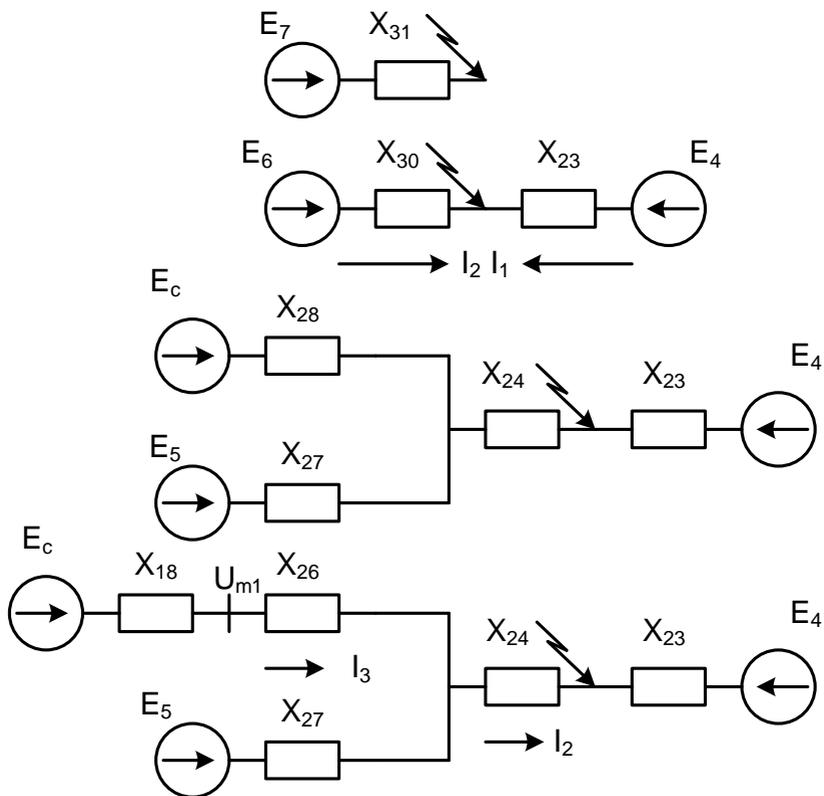


Рис. 4.23. Схема замещения для прямой последовательности

$$X_{29} = 1.197 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.321, \text{ Ом};$$

$$X_{28} = 0.658 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.808, \text{OM};$$

$$I_2 = \frac{E_6 - U_{K1}^{(2)}}{X_{29}} = \frac{224.4 - 68.191}{63.321} = 2.464, \text{KA};$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 2.464 \cdot \frac{34.808}{34.808 + 22.43} = 1.498, \text{KA};$$

$$X_{24} = 0.939 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.673, \text{OM};$$

$$X_{27} = 0.424 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.43, \text{OM};$$

$$X_{26} = 0.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.316, \text{OM};$$

$$U_{m1}^{(2)} = U_{K1}^{(2)} + I_2 \cdot X_{24} + I_3 \cdot X_{26} = 68.191 + 2.464 \cdot 49.673 + 1.498 \cdot 10.316 = 206.04 \text{KB.}$$

$$X_{29} = 1.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.235 \text{OM};$$

$$X_{28} = 0.659 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.843 \text{OM};$$

$$I_2 = \frac{U_{K2}^{(2)}}{X_{29}} = \frac{68.191}{63.235} = 1.078 \text{KA};$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 1.078 \cdot \frac{34.843}{34.843 + 22.85} = 0.651 \text{KA};$$

$$X_{24} = 0.935 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.435 \text{OM};$$

$$X_{27} = 0.432 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.85 \text{OM};$$

$$X_{26} = 0.196 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.392 \text{OM};$$

Для обратной последовательности.

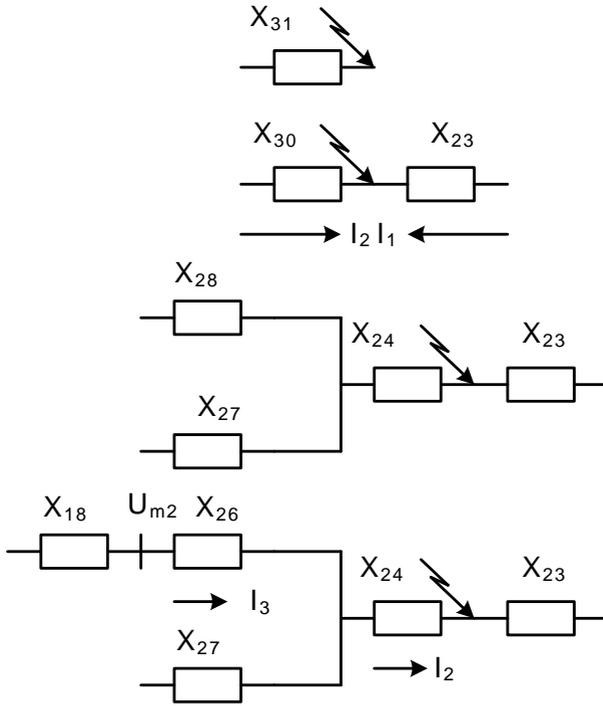


Рис. 4.24. Схема замещения обратной последовательности

$$U_{m2}^{(2)} = U_{K2}^{(2)} - I_2 \cdot X_{24} - I_3 \cdot X_{26} = 68.191 - 1.078 \cdot 49.435 - 0.651 \cdot 10.392 = 8.135 \text{ кВ.}$$

Определение фазных величин и построение векторной диаграммы на средней стороне автотрансформатора.

Для напряжений.

Напряжение в фазе А:

$$U_A^{(2)} = U_{K1}^{(2)} + U_{K2}^{(2)} = j206.04 + j8.135 = j214.175; \text{ кВ}$$

Напряжение в фазе В:

$$U_B^{(2)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(2)} + a \cdot U_{K2}^{(2)} = 172.177 - j107.087; \text{ кВ}$$

Напряжение в фазе С:

$$U_C^{(2)} = a \cdot U_{K1}^{(2)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(2)} = -172.177 - j107.087; \text{ кВ}$$

$$a^2 \cdot U_{K1}^{(2)} = 179.255 - j103.02; \kappa B;$$

$$a \cdot U_{K2}^{(2)} = -7.077 - j4.067; \kappa B;$$

$$a \cdot U_{K1}^{(2)} = -179.255 - j103.02; \kappa B;$$

$$a^2 \cdot U_{K2}^{(2)} = 7.077 - j4.067; \kappa B.$$

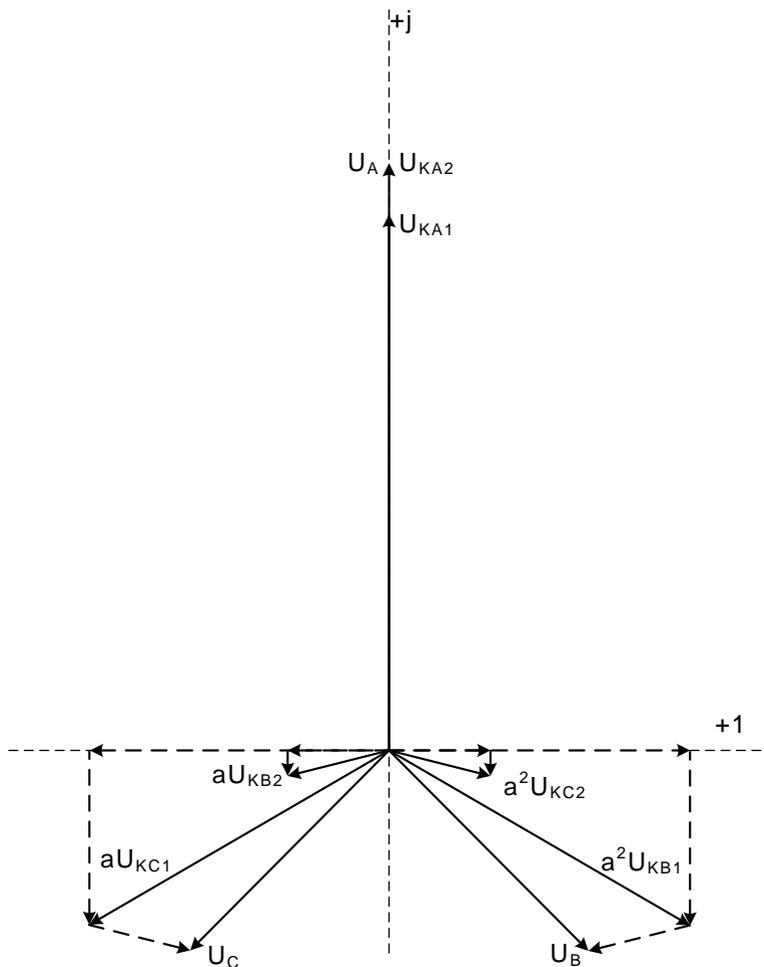


Рис. 4.25 Векторная диаграмма напряжений в точке короткого замыкания

4.6. Определение напряжения в удаленной точке на средней стороне автотрансформатора при двухфазном коротком замыкании на землю.

Падение напряжения от точки короткого замыкания до шин автотрансформатора для схемы прямой последовательности.

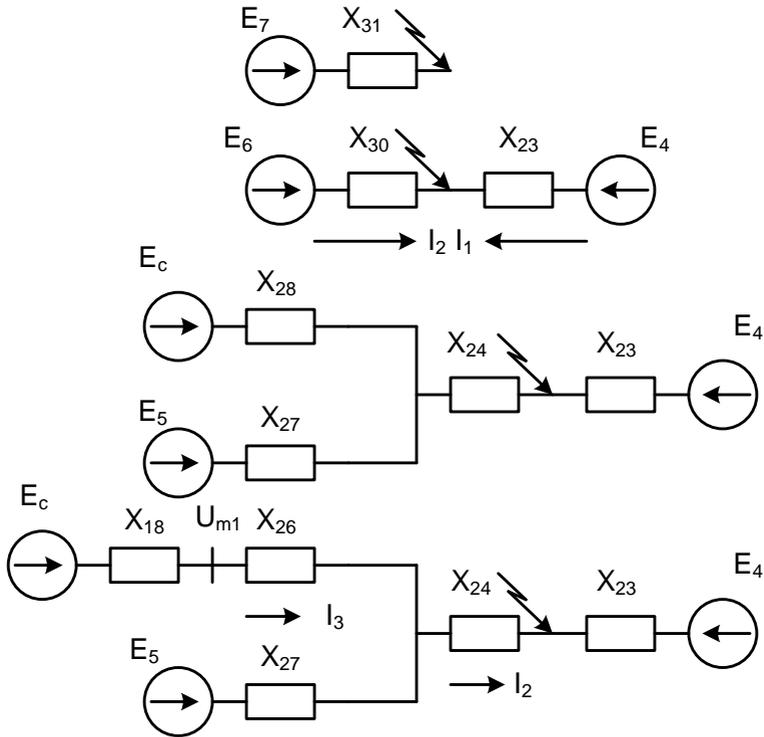


Рис. 4.26. Схема замещения прямой последовательности

$$X_{29} = 1.197 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.321, \text{ Ом};$$

$$X_{28} = 0.658 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.808, \text{ Ом};$$

$$I_2 = \frac{E_6 - U_{K1}^{(1,1)}}{X_{29}} = \frac{224.4 - 57.478}{63.321} = 2.633, \text{ кА};$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 2.633 \cdot \frac{34.808}{34.808 + 22.43} = 1.601, \text{ кА};$$

$$X_{24} = 0.939 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.673, \text{ Ом};$$

$$X_{27} = 0.424 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.43, \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.316, \text{ Ом};$$

$$U_{m1}^{(1,1)} = U_{K1}^{(1,1)} + I_2 \cdot X_{24} + I_3 \cdot X_{26} = 57.478 + 2.633 \cdot 49.673 + 1.601 \cdot 10.316 = 204.783 \text{ кВ.}$$

$$X_{29} = 1.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.235, \text{ Ом};$$

$$X_{28} = 0.659 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.843, \text{ Ом};$$

$$I_2 = \frac{U_{K2}^{(1,1)}}{X_{29}} = \frac{57.478}{63.235} = 0.909, \text{ кА};$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 0.909 \cdot \frac{34.843}{34.843 + 22.85} = 0.549, \text{ кА};$$

$$X_{24} = 0.935 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.435, \text{ Ом};$$

$$X_{27} = 0.432 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.85, \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.196 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.392, \text{ Ом};$$

$$U_{m2}^{(1,1)} = U_{K2}^{(1,1)} - I_2 \cdot X_{24} - I_3 \cdot X_{26} = 57.478 - 0.909 \cdot 49.435 - 0.549 \cdot 10.392 = 6.836, \text{ кВ.}$$

Для обратной последовательности.

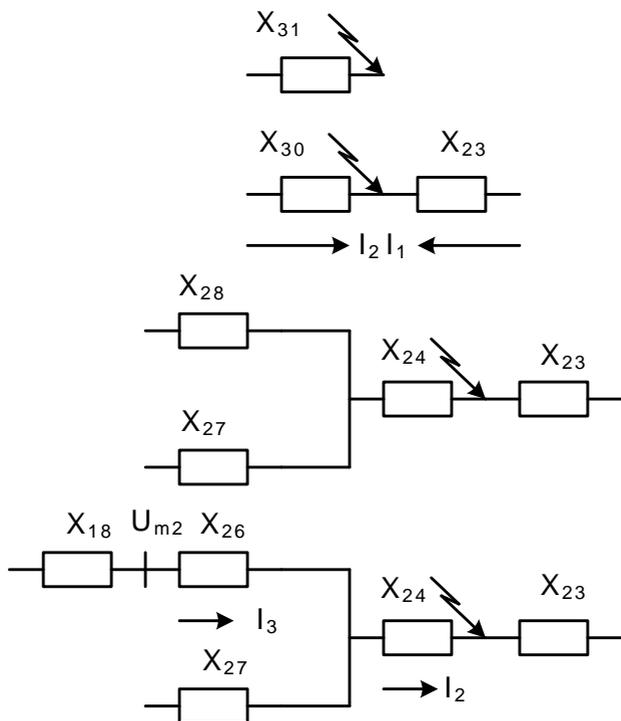


Рис. 4.27. Схема замещения обратной последовательности

Для нулевой последовательности.

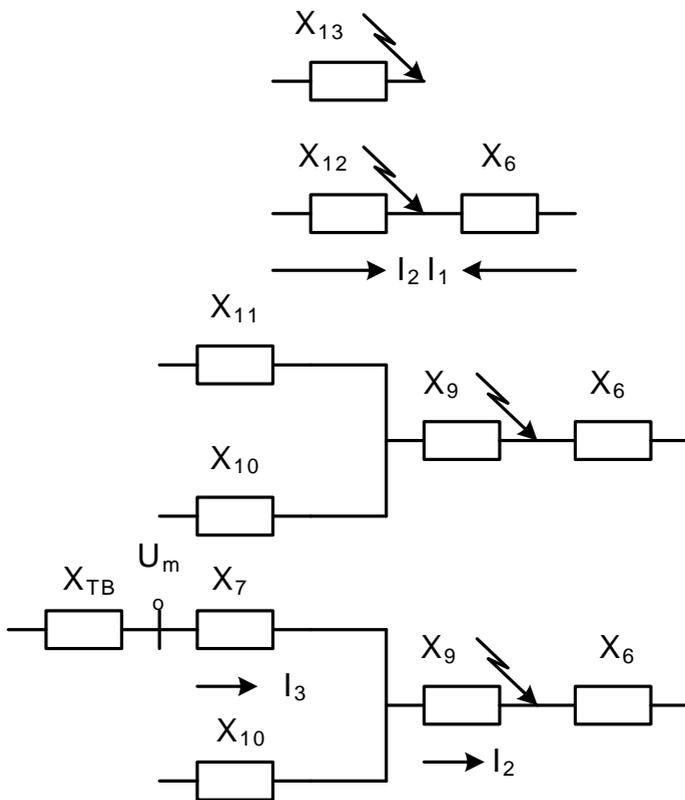


Рис. 4.28. Схема замещения нулевой последовательности

$$X_{12} = 4.375 \cdot \frac{230^2}{1000} = 231.44, \text{ Ом};$$

$$X_{11} = 0.668 \cdot \frac{230^2}{1000} = 35.337, \text{ Ом};$$

$$X_{10} = 1.923 \cdot \frac{230^2}{1000} = 101.73, \text{ Ом};$$

$$X_9 = 3.879 \cdot \frac{230^2}{1000} = 205.19, \text{ Ом};$$

$$X_7 = 0.464 \cdot \frac{230^2}{1000} = 24.546, \text{ Ом};$$

$$I_2 = \frac{U_{K0}^{(1,1)}}{X_{I2}} = \frac{57.478}{231.44} = 0.248, \text{ кА};$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{I1}}{X_{I0} + X_{I1}} = 0.248 \cdot \frac{35.337}{35.337 + 101.73} = 0.064, \text{ кА};$$

$$U_{mo}^{(1,1)} = U_{K0}^{(1,1)} - I_2 \cdot X_9 - I_3 \cdot X_{I1} = 57.478 - 0.248 \cdot 205.19 - 0.064 \cdot 24.546 = 5.02, \text{ кВ}.$$

Определение фазных величин и построение векторной диаграммы на средней стороне автотрансформатора.

Для напряжений.

Напряжение в фазе А:

$$U_A^{(1,1)} = U_{K1}^{(1,1)} + U_{K2}^{(1,1)} + U_{K0}^{(1,1)} = j204.783 + j6.836 + j5.02 = j216.639; \text{ кВ}$$

Напряжение в фазе В:

$$U_B^{(1,1)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(1,1)} + a \cdot U_{K2}^{(1,1)} + U_{K0}^{(1,1)} = 172.214 - j100.79; \text{ кВ}$$

Напряжение в фазе С:

$$U_C^{(1,1)} = a \cdot U_{K1}^{(1,1)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(1,1)} + U_{K0}^{(1,1)} = -172.214 - j100.79; \text{ кВ}$$

$$a^2 \cdot U_{K1}^{(1,1)} = 178.161 - j102.391; \text{ кВ};$$

$$a \cdot U_{K2}^{(1,1)} = -5.947 - j3.418; \text{ кВ};$$

$$a \cdot U_{K1}^{(1,1)} = -178.161 - j102.391; \text{ кВ};$$

$$a^2 \cdot U_{K2}^{(1,1)} = 5.947 - j3.418; \text{ кВ}.$$

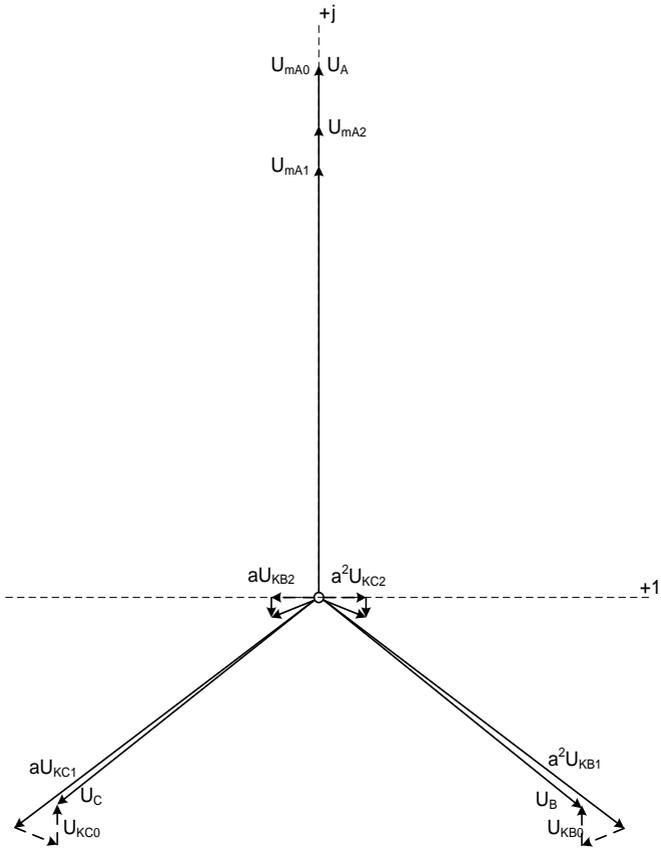


Рис. 4.29. Векторная диаграмма напряжений в точке короткого замыкания

Библиографический список

1. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. - 152 с.
2. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети / Г.А. Евдокунин. - Спб.: Издательство Сизова М.П., 2004. -304с.
3. Цыгулев Н.И. Токи короткого замыкания в электрических системах: Учеб. Пособие / Н.И. Цыгулев. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 72.
4. Мелешкин Г.А. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: Монография. – Спб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2005. – 376с.
5. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. Пособие. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 284с.
6. Переходные процессы в электроэнергетических системах: метод. указания к выполнению лаб. работ для студентов очной и заочной форм обучения специальности 140211 – «Электроснабжения» и направления бакалавриата 140200 «Электроэнергетика» / сост.: А.А. Виноградов, М.Н. Нестеров, С.В. Килин, Р.С. Сингатулин, - Белгород: Изд-во БГТУ, 2012.- 38с.

Учебное издание

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к выполнению курсового проекта
для студентов очной и заочной форм обучения
специальности 140211 – Электроснабжение и направления
бакалавриата 140400 «Электроэнергетика и электротехника»

Составители: **Килин** Станислав Витальевич
Синдецкий Максим Александрович
Сингатулин Роман Сергеевич
Клименко Юрий Юрьевич
Михайлова Марина Юрьевна

Подписано в печать 15.02.13. Формат 60 х 84/16. Усл. печ. л. 3,4. Уч.-изд. л. 3,6.

Тираж 100 экз. Заказ Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46